

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra výrobních strojů a konstruování

Detekce tepelně indukovaných strukturních změn  
konstrukčních materiálů sondami Phased Array

Assessment of Structural Changes of Steel  
Caused by Heat or Combination of Heat and Pressure  
Detected by Phased Array Probes

Studentka:  
Vedoucí diplomové práce:

Bc. Marie Mořkovská  
Ing. Jan Blata, Ph.D.

Ostrava 2019



VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra výrobních strojů a konstruování

## Zadání diplomové práce

Student:

**Bc. Marie Mořkovská**

Studijní program:

N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

3909T001 Konstrukční a procesní inženýrství

Specializace:

72 Technická diagnostika, opravy a udržování

Téma:

**Detekce tepelně indukovaných strukturních změn konstrukčních materiálů sondami Phased Array  
Assessment of Structural Changes of Steel Caused by Heat or  
Combination of Heat and Pressure Detected by Phased Array Probes**

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

Navrhnete metodiku pro hodnocení tepelně indukovaných strukturních změn konstrukčních materiálů. Využijte vhodných dostupných měřících zařízení a postupů. V rámci zadání zpracujte:

1. Rešerši a analýzu dané problematiky.
2. Ideový a technický návrh metodiky měření.
3. Konkrétní verifikační implementaci navržené metodiky formou experimentálního měření.
4. Vyhodnocení přínosů navržené metodiky s dalšími možnými měřeními.

Další specifikace bude provedena v průběhu zpracovávání diplomové práce.  
Rozsah práce min. 45 stran textu.

Seznam doporučené odborné literatury:

ZAVADIL, T. *Využití NDT metod pro detekci strukturálních změn oceli při určování zbytkové životnosti průmyslových zařízení*. ATG 2012

MOORE, Patrick O. *Ultrasonic Testing*. 3rd edition, ASNT 2007

ASM Handbook Committee *Volume 17 – 9th edition 1989, Volume 15 – 3rd edition 1996, Volume 9 – 3rd edition 1998*

*Interní podkladové materiály*

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Blata, Ph.D.**

Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019

---

doc. Dr. Ing. Ladislav Kovář  
vedoucí katedry



---

prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a konzultantů a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě .....20.5.2019.....

.....  
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou (bakalářskou) práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou (bakalářskou) práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová (bakalářská) práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové (bakalářské) práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě ..... 20.5.2019

.....  
podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Marie Mořkovská

Adresa trvalého pobytu autora práce: Moravská 2642/86, 70030 Ostrava – Zábřeh

*Děkuji panu Ing. Janu Blatovi, Ph.D za odborné vedení a trpělivý přístup při zpracování této práce. Hlavní zásluhu na realizaci experimentu má pan Ing. Tomáš Zavadil, MBA, IWE, který výrazným způsobem ovlivnil směřování celé práce, pomáhal mi v pochopení dané problematiky a svými znalostmi a zázemím ve společnosti ATG s.r.o. zaručil optimální vývoj vypracování celé práce. Dále bych chtěla poděkovat Ing. Petru Žbánkovi, který obrovským způsobem pomáhal nejen s technickými nejistotami v rámci celého experimentu, Jakubu Romaňákovi, který pomáhal ve sběru a zpracování dat a Ing. Jiřímu Cieslarovi, Ph.D., IWE za cenné rady. Dále děkuji svým přátelům a rodině, zejména své matce za nekonečnou podporu po celou dobu studia. V neposlední řadě velice děkuji svému manželovi Vojtěchovi za trpělivost, značnou motivaci a věčnou podporu.*

## **ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE**

MORŤKOVSKÁ, Marie. Detekce tepelně indukovaných strukturních změn konstrukčních materiálů sondami Phased Array. Ostrava, 2019. Diplomová práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra výrobních strojů a konstruování. Vedoucí práce Ing. Jan Blata, PhD.

Tato práce je zaměřena na ověření aplikovatelnosti ultrazvukové techniky phased array pro měření poměru rychlostí šíření podélných a příčných ultrazvukových vln. Měření poměru rychlostí je v současné době vyvíjená metodika společnosti ATG, s.r.o. ke zjišťování změn mikrostruktury způsobené tepelným zpracováním či vysokoteplotními degradačními procesy. Úvodní část se zabývá problematikou tlakových zařízení a vysokoteplotními degradačními procesy v energetice, kde se předpokládá možné využití navrhované metodiky. Je navržen způsob použití sond phased array pro efektivní buzení jednotlivých typů ultrazvukových vln. Experimentální část se ve své první části věnuje ověření citlivosti měření s použitím tohoto typu sond a vlivy které mohou nejistotu měření ovlivnit. Schopností detekce změn mikrostruktury a lokálního stavu deformace svarových spojů se věnuje druhá část experimentu. Závěrečná část ukazuje možné využití pro oblast energetického průmyslu na vzorku provozované části parovodu zatíženého tečením. V práci je prokázáno, že nejistota měření za použití phased array sond je o řád lepší než při použití konvenčních UT sond a dané uspořádání je schopno detekovat i malé změny mikrostruktury vyvolané např. napojením svarů.

Klíčová slova: ultrazvuk, phased array, mikrostruktura, degradační procesy, energetika, tečení

## **ANOTATION OF MASTER THESIS**

MORŤKOVSKÁ, Marie. Assessment of Structural Changes of Steel Caused by Heat or Combination of Heat and Pressure Detected by Phased Array Probes. Ostrava, 2019. Master thesis. VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Production Machines and Design.

This thesis is focused on verification of applicability of Phased Array ultrasonic technique for measuring of the longitudinal to transversal ultrasonic waves velocity ratio. Measuring of velocity ratio is a methodology currently under development by company ATG, s.r.o. and intended for localization of changes of microstructure caused by heat treatment or high-temperature degradation processes. The introduction deals with problematics of pressure equipment and high-temperature degradation processes in power industry, where the possible



use of the methodology is expected. Use of the phased array probes for effective excitation of ultrasonic waves was designed as a part of this thesis. In the first part of the experiment includes verification of measurement sensitivity using this type of probes and effects that may affect measurement uncertainty in its first part. The second part deals with the ability to detect changes in microstructure and local state of deformation of welded joints. Last part of the experiment shows the possible use for the plant industry on an operated sample from a steam pipeline subjected to creep. It was proven in this thesis that the measurement uncertainty by using phased array probes is lower by one order compared to conventional UT probes and that this setup is able to detect even small changes of microstructure caused by e.g. weld restarts.

Key words: ultrasonic, phased array, microstructure, degradation processes, power plant industry, creep

## Obsah

1	Tlaková zařízení .....	15
1.1	Základní charakteristika tlakových zařízení .....	15
1.1.1	Nádoby .....	16
1.1.2	Potrubí .....	16
1.1.3	Tlaková výstroj .....	16
1.2	Problematika tlakových zařízení .....	16
1.2.1	Vyhrazená technická zařízení .....	17
1.2.2	Pressure Equipment Directive .....	18
1.2.3	Provoz zařízení .....	18
1.3	Výroba tlakových zařízení .....	19
1.3.1	Materiály pro výrobu tlakových zařízení .....	20
1.3.2	Svařování při výrobě tlakových zařízení .....	20
1.4	Provoz a údržba tlakových zařízení .....	21
2	Vysokoteplotní degradační procesy .....	23
2.1	Hlavní degradační procesy v energetice .....	23
2.1.1	Tepelné ovlivnění .....	23
2.1.2	Tečení (creep) .....	30
2.1.3	Koroze .....	32
2.1.4	Únava .....	34
2.1.5	Opotřebení .....	34
2.2	Detekce degradačních stavů .....	35
3	Detekce tepelného ovlivnění ultrazvukovou metodou .....	38
3.1	Obecný popis ultrazvukového vlnění .....	38
3.1.1	Podélné ultrazvukové vlny .....	38
3.1.2	Příčné ultrazvukové vlny .....	38

3.2	Metodika poměru rychlostí ultrazvukových vln .....	39
3.3	Problémy současné metodiky .....	41
4	Ověření schopnosti sond Phased Array detekovat tepelná ovlivnění prostřednictvím sledování trendu poměru rychlostí podélných a příčných ultrazvukových vln .....	43
4.1	Technika Phased Array .....	43
4.2	Experimentální uspořádání .....	45
4.2.1	Měřicí zařízení .....	45
4.2.2	Předsádka .....	46
4.2.3	Sondy .....	46
4.3	Princip experimentu .....	47
5	Výsledky měření .....	50
6	Diskuze .....	69
6.1	Přesnost absolutních hodnot poměru $L/T$ .....	69
6.2	Vliv vzdálenosti sond .....	70
6.3	Detekce změn svařovacích parametrů .....	70
6.4	Detekce lokálních strukturních změn .....	71
6.5	Vliv vad na schopnost detekce a na nejistotu měření .....	72
6.6	Použití sond Phased Array pro provozované součásti .....	73
6.7	Použití v praxi .....	73
7	Závěr .....	74
8	Bibliografie .....	76
9	Seznam obrázků .....	82
10	Seznam rovnic .....	84
11	Seznam tabulek .....	85
12	Seznam grafů .....	86
13	Seznam příloh .....	87

## Seznam použitých zkratk a symbolů

### *Použité symboly*

Označení	Legenda	Jednotka
A1	překrystalizační teplota v diagramu 727 °C Fe - Fe <sub>3</sub> C	[°C]
Ac <sub>3</sub>	křivka překrystalizačních teplot v diagramu Fe - Fe <sub>3</sub> C	[°C]
B <sub>f</sub>	křivka Bainit finish	[°C]
B <sub>s</sub>	křivka Bainit start	[°C]
c <sub>L</sub>	rychlost šíření podélných ultrazvukových vln	[m·s <sup>-1</sup> ]
c <sub>T</sub>	rychlost šíření příčných ultrazvukových vln	[m·s <sup>-1</sup> ]
E	modul pružnosti v tahu	[Mpa]
f	frekvence	[Hz]
F	síla	[N]
G	modul pružnosti ve smyku	[MPa]
I	proud	[A]
L	délka vzorku	[mm]
l <sub>m,n</sub>	Murnaghanovy konstanty	[-]
M	moment síly	[N.m]
M <sub>s</sub>	martenzit start	[°C]
N1-N4	napojení ve svarové housence	[-]
N	počet cyklů do lomu	[-]
P <sub>f</sub>	perlit finish	[°C]
P <sub>s</sub>	perlit start	[°C]
Q	množství vneseného tepla	[J]
Q <sub>c</sub>	aktivační energie tečení	[kJ/mol]
R <sub>2</sub>	hodnota spolehlivosti	[-]
Re	mez kluzu	[MPa]
R <sub>m</sub>	pevnost v tahu	[MPa]
s <sub>L</sub>	dráha podélné ultrazvukové vlny	[m]
s <sub>T</sub>	dráha příčné ultrazvukové vlny	[m]
t	čas	[s]
T	teplota	[°C]
t <sub>0</sub>	počáteční teplota	[°C]
T <sub>g</sub>	mezní teplota pro daný materiál	[°C]
t <sub>L</sub>	čas šíření podélné ultrazvukové vlny	[s]
t <sub>vz</sub>	tloušťka vzorku	[mm]
U	napětí	[V]
v	rychlost	[m·s <sup>-1</sup> ]
w	vzdálenost předsádek	[mm]
α	úhel odrazu ultrazvukového vlnění	[°]
β	úhel příjmu vlnění	[°]
Δt <sub>8/5</sub>	interval teplot	[-]
Δt <sub>3/1</sub>	interval teplot	[-]

$\varepsilon$	poměrná deformace	[-]
$\lambda$	vlnová délka	[m]
$\mu$	Poissonovo číslo	[-]
$\xi, \gamma$	Lamého konstanty	[-]
$\rho$	hustota	[kg·m <sup>-3</sup> ]
$\sigma$	napětí v tahu	[Pa]
$\sigma_h$	horní napětí	[Pa]
$\sigma_d$	dolní napětí	[Pa]

### *Použité zkratky*

ARA	anizotermický rozpad austenitu
ASME BBPVC	American Society of Mechanical Engineers Boiler & Pressure Vessel Code
CE	conformité européenne
ČSN	Česká soustava norem
EN	Evropská norma
FCAW	flux-cored wire metal arc welding
HT	heat treatment
HV	tvrdost dle Vickerse
ISO	International Organization for Standardization
MIG/MAG	metal inert gas/metal active gas
MMA	manual metal arc welding
N	počet cyklů do lomu
NDT	non destructive testing
PA	Phased Array
PED	Pressure Equipment Directive
PWHT	post welding heat treatment
SAW	Submerged arc welding
TeZ	tepelné zpracování
TIG	tungsten inert gas
TOFD	Time of Flight Diffraction
TOO	tepelně ovlivněná oblast
TZ	tlakové zařízení
VTZ	vyhrazené technické zařízení
WPS	welding procedure specification

## Úvod

Cílem této práce je ověření aplikovatelnosti phased array sond pro strukturní analýzu uhlíkových ocelí pomocí měření poměru rychlostí šíření podélných a příčných ultrazvukových vln ( $c_L/c_T$ ). Metoda měření změny poměru  $c_L/c_T$  byla řešena v [1], kde bylo prokázáno, že velikost poměru  $c_L/c_T$  je závislá na změně mikrostruktury a lokálním stavu deformace zkoušené části dílu, která provází jak procesy tepelného zpracování, tak vysokoteplotní degradační procesy.

Práce si klade za cíl navržení způsobu, jak generovat oba typy ultrazvukových vln (podélných i příčných) tak, aby byly vyslány po stejné dráze, tj. především pod stejným úhlem, za použití pouze jedné vysílací sondy. V rámci ověření funkčnosti návrhu je nutné ověřit, zda při použití sond phased array bude možné dosáhnout nízké úrovně nejistoty ve srovnání s použitím páru přímých konvenčních ultrazvukových sond, jako tomu bylo v diplomové práci [1], o jejíž výsledky se opírá tato práce. Ověření schopnosti phased array sond detekovat s dostatečnou přesností změny struktury je v této práci realizováno na svařovaných vzorcích metodou MAG. Ke zjištění výše uvedeného budou provedeny experimenty na vzorcích různých ocelových materiálů (P265H, C45+N a 54SiCr6), jež budou podélně svařeny dle návrhu. Z těchto materiálů bude k dispozici 12 vzorků, čtyři vzorky pro každý materiál. Změny mikrostruktury jsou na jednotlivých vzorcích vyvolány změnou hlavních svařovacích parametrů na jednotlivých vzorcích a tvorbou napojení svarových housenek, kde dochází k lokálním změnám stavu deformace.

Očekávaným výsledkem práce je ověření aplikovatelnosti phased array sond pro měření poměru ultrazvukových vln, sloužících k prokázání vlivu změny mikrostruktury zkoušených materiálů v důsledku ovlivnění vysokoteplotními degradačními procesy (zejména tečení). Předpokládá se, že díky použití této metodiky bude zvýšena přesnost měření oproti využití konvenčních ultrazvukových sond v [1] a zlepší se praktická aplikovatelnost díky odstranění potřeby použití více sond pro buzení jednotlivých ultrazvukových vln.

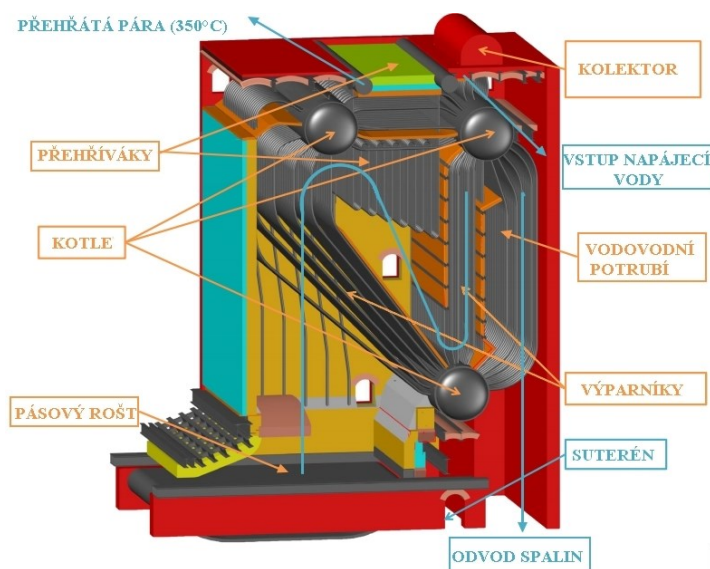
Obsah této práce je dílčí částí výzkumu financovaného společností ATG (Advanced Technology Group), s.r.o. Společnost ATG, s.r.o. se zabývá výrobou průmyslových NDT zařízení, provádění NDT kontrol, poradenskou činností v oblasti NDT a provádění průmyslových inspekcí. Snahou tohoto výzkumu je nalézt vhodnou metodiku pro detekci kritických míst dlouhodobě provozovaných průmyslových celků vystavených degradačním

mechanismům, především pak procesu tečení. Metodika použitá a popsaná v této práci je výhradním duševním vlastnictvím společnosti ATG, s.r.o.

# 1 Tlaková zařízení

## 1.1 Základní charakteristika tlakových zařízení

Tlakovými zařízeními (dále jen „TZ“) rozumíme konstrukční celky, které jsou tvořeny vymezenými prostory s pevnými a nepohyblivými stěnami, na jež vnitřním přetlakem působí látky kapalné, plynné, prašné, a také vzduch. Využití TZ je mnohostranné, a to na skladování, generování nebo dopravování průmyslových produktů. Mezi ně např. řadíme technologickou páru, nebo páru pro elektrárenské účely (uhelné a paroplynové elektrárny, jaderné elektrárny), jež je produktem využívaným u problematiky řešené v této práci, viz např. obrázek 1 níže, kde je technologická pára uplatněna při výrobě destilátů v lihovaru. [2; 3] Dále pak také produkty petrochemického průmyslu, kde slouží jak k dopravě surové ropy do rafinerie, tak u výsledných produktů do skladovacích tanků, dále v pivovarech, lihovarech, farmaceutickém a potravinářském průmyslu pro generování technologické páry a dalších, které nejsou předmětem této práce.



Obrázek 1- Generace přehřáté páry v lihovaru [4]

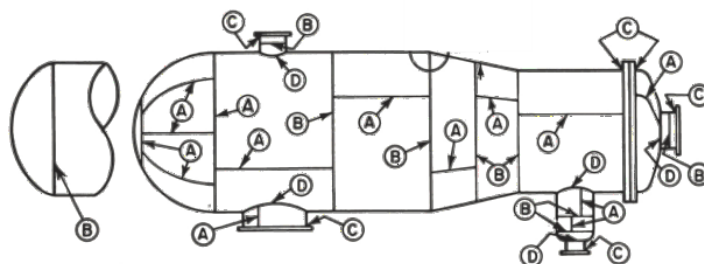
Mezi tlaková zařízení, které jsou předmětem této práce, jsou řazeny:

- nádoby,
- potrubí,
- tlaková výstroj.



### 1.1.1 Nádoby

Nádoby jsou tělesa navržena a zhotovená tak, aby mohla být naplněna tekutinou v širokém rozsahu teplot a tlaků, včetně součástí, které jsou k nim přímo připevněny a zasahují až k místu spojení s jiným tlakovým zařízením. Konstrukce tlakových nádob je nejčastěji vyráběna svařováním plechů, ale existují i nádoby nesvařované. Z hlediska rozložení napětí jsou nejstabilnějšími tvary kulové, válcové a polokulové, a proto mají tlakové nádoby typicky tvar viz obrázek 2. [5]



Obrázek 2- Válcová tlaková nádoba s vyznačením kategorií svarů (A – nejnebezpečnější, D – nejméně nebezpečný) [6]

### 1.1.2 Potrubí

Potrubí je soustava trubek, trub, tvarovek, dilatačních spojů, hadic, výměníků tepla, popř. dalších částí vystavených tlaku, určených k přepravě tekutin. Tyto části jsou vzájemně spojeny tak, že tvoří jeden tlakový systém, typicky svařováním. Všechny části potrubního systému musí být nepropustné a uloženy tak, aby byly adekvátně chráněny před mechanickým poškozením, případně korozí. [5]

### 1.1.3 Tlaková výstroj

Mezi tlaková zařízení v obecném smyslu patří i bezpečnostní a tlaková výstroj a také prvky připojené k součástem vystaveným tlaku (příruby, hrdla, spojky, podpory, závěsná oka apod.). [5]

## 1.2 Problematika tlakových zařízení

Nebezpečí tlakových zařízení plyne v první řadě ze zadržované energie tvořené teplotou a vnitřním tlakem. V důsledku vysokých tlaků, které se pohybují v hodnotách překračujících 1 MPa, a fyzikálních a chemických vlastností uskladněných látek, je v případě nehody ohroženo okolí ve značné vzdálenosti. Závažné nehody si mimo obrovských materiálních škod vyžádaly oběti i na lidských životech. Např. v mexickém průmyslovém podniku PEMEX došlo v roce 1984 vlivem prasklého potrubí k úniku plynu, jež se vznítil, a následný výbuch poškodil stavby a zařízení v okruhu 1200 m a usmrtil více než 500 lidí. Ukázka následků

exploze viz obrázek 3. V roce 2010 dvě osoby usmrtil a 13 zranil výbuch akumulátoru páry v české firmě Avon Automotive, části tlakové nádoby byly nalezeny až ve vzdálenosti 300 m od místa neštěstí. Havárie, která se stala ve výrobě Briston Carpet roku 2013 neměla za následek žádná zranění, nicméně byla společnosti vyměřena pokuta ve výši 10 000 liber. [2; 7; 8; 9]



*Obrázek 3- San Juanico, 1984 [10]*

### **1.2.1 Vyhrazená technická zařízení**

Z důvodu své nebezpečnosti patří tlaková zařízení do skupiny vyhrazených technických zařízení (dále jen „VTZ“).<sup>1</sup> Dle zákona jsou tato zařízení definována pracovním přetlakem a teplotou pracovní kapaliny. Patří zde [11]:

- parní a kapalinové kotle s konstrukčním přetlakem přesahujícím 0,07 MPa a teplotou pracovní látky převyšující bod varu při tomto přetlaku,
- tlakové nádoby stabilní, u nichž nejvyšší pracovní přetlak přesahuje 0,07 MPa, a které obsahují plyny, páry nebo žíravé, jedovaté a výbušné kapaliny o jakékoliv teplotě nebo jakékoliv kapaliny o teplotě převyšující jejich bod varu při přetlaku 0,07 MPa,
- kovové tlakové nádoby k dopravě plynů, jejichž kritická teplota je nižší než +50 °C, nebo plynů, u nichž při teplotě +50 °C je absolutní tlak par vyšší než 0,3 MPa.

VTZ jsou zařízení se zvýšenou mírou ohrožení zdraví a bezpečnosti osob a majetku, která podléhají doзору podle zákona č. 174/1968 Sb. o státním odborném doзору nad bezpečností práce. Podle stupně nebezpečnosti se VTZ zařazují do tříd, popřípadě skupin a stanoví se způsob prověřování odborné způsobilosti organizací, podnikajících fyzických osob a fyzických osob k činnostem na těchto zařízeních.

---

<sup>1</sup> Dále do této skupiny patří zařízení zdvihací, elektrická a plynová.

### **1.2.2 Pressure Equipment Directive**

V Evropské unii platí, že všichni výrobci musí na evropský trh dodávat výhradně bezpečná zařízení. [12] Výrobce tak činí prohlášením o shodě (označení CE), čímž na svou odpovědnost prohlašuje, že splnil veškeré požadavky stanovené směrnicemi EU (dále rozšířeno o nařízení vlády pro ČR) a příslušnými evropskými normami, a dále také, že je výrobek bezpečný. V případě tlakových zařízení musí být tato v souladu s direktivou evropského a rady 2014/68/EU (Pressure Equipment Directive, dále jen „PED“), jež stanovuje postup na prokázání, zda jsou tlaková zařízení nebo jejich sestavy v souladu s příslušnými požadavky. Ekvivalentem pro tlaková zařízení na americkém trhu je tzv. ASME stamp. Většina třetích zemí přejímá požadavky ASME a buď doslovně, nebo na jejich základě vytváří vlastní národní směrnice. Obojí, CE i ASME stamp, dává najevo, že tlakové zařízení vyhovuje bezpečnosti provozu. Vzájemně kód ASME BPVC a směrnice PED s příslušnými návaznými normami nejsou zcela harmonizovány. [3; 13]

### **1.2.3 Provoz zařízení**

Majitelé či provozovatelé jsou povinni se řídit požadavky na VTZ, ty jsou v této oblasti seřazeny dle důležitosti v pořadí zákon, nařízení vlády, vyhláška a norma. Právní předpisy slouží jako obecný požadavek, ale neobsahují postupy pro provoz zařízení. Norma je pokyn, který provozovatelům VTZ dává specifické informace o provozu zařízení a více zohledňuje provoz daného zařízení v praxi. [2] Provozovatelé proto musí mít definovaný postup provozu zařízení ve svém manuálu kvality a mít veškerou požadovanou dokumentaci, formulovanou např. v ČSN 690010.

Dodržováním daných předpisů se snažíme vyvarovat rizikům. Bohužel i v případě, že je dodrženo prohlášení o shodě i požadavky na provoz zařízení, je tento provoz nepředvídatelný. Při navrhování vybraného zařízení, které zahrnuje jeho vývoj, projektování a konstrukci, musí být zpracována výstupní dokumentace procesu návrhu, která musí být v souladu s technickými požadavky na vybrané zařízení. V návrhu zařízení musí být stanovena kritéria přijatelnosti pro sledování a hodnocení spolehlivosti i životnosti. Každé zařízení má danou životnost, během níž jsou naplánovány pravidelné revize, např. v České republice požaduje norma ČSN 690012 vnitřní revizi co 5 let, nebo každých 20 % životnosti. Jakmile je vyčerpána navrhovaná životnost zařízení, změní se metodika a při každé další revizi je určena zbytková životnost, na základě které je určen i další termín nejbližší revize, aby byla stále zajištěna způsobilost provozu a byla naplněna snaha předejít rizikům jak bezprostředním, tak dlouhodobým. [2; 14]

### 1.3 Výroba tlakových zařízení

Směrnice PED je právní předpis, který stanovuje požadavky na bezpečnost u tlakových zařízení, a tím umožňující volný pohyb tlakových zařízení v EU. Základní požadavky směrnice jsou často spíše obecné, ale objevují se i požadavky specifické, které musí být dodrženy. Protože se podle této směrnice nedají zařízení konstruovat, vyrábět ani zkoušet, musí být doplněna o tzv. harmonizovanou výrobovou normu (tzn. že znění předmětné normy je totožné s normou platnou ve státech EU – zákon č. 22/1997 Sb.). Obvykle je tato norma uvedena již ve smlouvě o dodávce/výrobě daného tlakového zařízení. Při realizaci podle PED je použito harmonizovaných norem např. ČSN EN 13445 – tlakové nádoby, ČSN EN 12952 – vodotrubné kotle, ČSN EN 12953 – válcové kotle, ČSN EN 13480 – kovové potrubí. U tlakových zařízení, která odpovídají harmonizovaným normám, se předpokládá, že vyhovují základním požadavkům směrnice a že jsou splněny základní požadavky na bezpečnost. [3; 13]

Tabulka 1.1 – Příklad evropských a ekvivalentních amerických standardů

Téma	EU harmonizované normy	US standardy
<b>Konstrukce</b>	EN 1090-1:2009+A1:2011	ASME BPVC Section VIII
<b>Kotle / tlakové nádoby</b>	EN 13445-1:2002	ASME BPVC
<b>Potrubní systém</b>	EN 13480-1:2002	ANSI B31
<b>Distribuce produktů</b>	EN 12972:2007	API 1109
<b>Skladování</b>	EN 12285-2:2005	API 650
<b>Svařovací procedury</b>	EN ISO 15614-1:2004	ASME BPVC Section IX
<b>Kvalifikace personálu</b>	EN ISO 9606:2013, EN ISO 9712:2012,	AWS QC1, SNT-TC-1 A

Na druhé straně ASME BPVC stanovuje pravidla bezpečnosti pro projektování, konstrukci, výrobu, zkoušení nejen parních kotlů a tlakových nádob, ale také tlakových zařízení užívaných v jaderných elektrárnách. Dalším rozdílem je, že ASME BPVC není právní předpis, ale konstrukční standard obecně uznávaný v USA a dalších zemích. Dále umožňuje výrobcům provádět řadu činností sám o sobě jen s vlastní příručkou kvality. [13; 15]

Mezi PED a ASME BPVC je mnoho dalších základních rozdílů, mezi které například patří rozdílné materiály, jejich certifikace i vlastnosti, svařovací procedury, kvalifikace svářečů a NDT pracovníků. U PED je také vyžadována Analýza rizik, současně se po výrobci požaduje vytvoření provozních pokynů a jejich dodání spolu s tlakovým zařízením a další. [3; 13]

Vlastnosti svařovaných i přídavných materiálů vystavených tlaku musí vyhovovat požadavkům za všech provozních podmínek, které lze předvídat a za všech zkušebních podmínek. Musí být také dostatečně chemicky odolné v prostředí tekutiny obsažené v TZ, vhodné pro plánované technologické postupy a nesmějí být ovlivněny stárnutím. [5; 16]

Prvním a hlavním faktorem, jenž je třeba brát v úvahu při výstavbě TZ, je proto požadavek státu a specifikace klienta. Ty mohou předurčit výrobní kód nebo direktivu, která může určit, jaké materiály a postupy výroby včetně metod svařování jsou povoleny, jaké jsou požadavky na kvalitu i jaký typ zkoušek je požadovaný pro ověření dosažení kvality atd.

### **1.3.1 Materiály pro výrobu tlakových zařízení**

Druh materiálu (i jeho tloušťka) plyne z provozních požadavků. Materiál musí splňovat všeobecné požadavky a musí být vhodný pro použití na TZ po celou dobu plánované životnosti. V úvahu se bere struktura materiálu i pevnost materiálu a tažnost, jelikož při svařovacím procesu vznikají v materiálu značná vnitřní pnutí, obzvlášť v tepelně ovlivněné oblasti. Provozní požadavky také určí, zda je nutná odolnost proti korozi, pracovní cykly nádob a požadovaný pracovní tlak. K dílům musí být doloženy dokumenty kontroly.

### **1.3.2 Svařování při výrobě tlakových zařízení**

Svařování je v dnešní době hlavní mechanismus spojování tlakových zařízení v nerozebíratelný celek. Současně se však jedná o náročný proces, jehož požadavky musí být striktně dodržovány, aby svary mohly plnit svou úlohu v provozu zařízení. Na nosné svary tlakových nádob jsou obecně kladeny vysoké požadavky, které jsou poplatné i umístění a orientaci svaru, jak je demonstrováno výše viz obrázek 2. Svary jsou při výrobě podrobeny kontrole kvality, aby se minimalizovalo riziko případného selhání zařízení po dobu jeho životnosti. Části tlakové nádoby mohou být spojovány svařováním jen při splnění určitých podmínek. Svářeči a svářečští operátoři jsou kvalifikováni a mají platná osvědčení podle platných předpisů, v ČR pak dle ČSN EN ISO 9606. Aby byla zajištěna požadovaná kvalita svaru, je zvolení nejlepšího procesu svařování rozhodující. [5; 17; 16]

Mezi běžně používané metody svařování tlakových nádob se využívají – svařování obalenou elektrodou (MMA), svařování v ochranné atmosféře tavící se elektrodou (MIG/MAG), nebo netavící se wolframovou elektrodou (TIG), svařování pod tavidlem drátovou elektrodou (SAW), svařování plněnou elektrodou (FCAW) a plazmové svařování. Každá z těchto metod má svá pro a proti, která souvisí s kvalitou svaru, rychlostí svařování, možností automatizace atd. Konkrétní výhody a nevýhody jednotlivých metod svařování jsou podrobně popsány například v [18; 19; 20].

#### **1.4 Provoz a údržba tlakových zařízení**

Provoz tlakových zařízení zavazuje provozovatele k přijetí veškerých opatření tak, aby při uvedení do provozu byla provedena správná instalace, včetně montáže jednotlivých částí tlakového zařízení a uvedení do provozu, aby během provozu probíhaly řádně revize a údržby, včetně kontrol prováděných uživatelem, a aby bylo zařízení používáno k určeným účelům. Nezbytné je splnění požadavků na ochranu osob dotčených při používání tlakových zařízení nebo sestav. Výše uvedené požadavky musí být v souladu s platnou legislativou dle trhu, na kterém je zařízení dodáváno. [2; 3; 21]

Před uvedením tlakové nádoby do provozu musí provozovatel disponovat dokumentací daného zařízení, zejména o úspěšné tlakové zkoušce, a předběžně stanovenými provozními předpisy, které jsou výsledkem zkušebního provozu. Provozovatel tlakového zařízení je povinen jmenovat revizního technika, osobu zodpovědnou za bezpečný a hospodárny provoz (prokazatelně určenou) a obsluhu tlakových nádob. [21; 22; 11]

Výchozí kontrola zařízení musí být provedena před uvedením do provozu, 14 dní poté je provedena první provozní revize. Lhůta pro další revizi je stanovena normou (např. ČSN EN 764-6) s přihlédnutím na stav, stáří, konstrukci, provozní podmínky a druh provozní tekutiny. [22; 23]

U tlakových zařízení by vždy měla být zavedena preventivní údržba, jejímž účelem je předcházení selhání a udržování předmětu údržby v dobrém stavu, doplněna prediktivní údržbou, při níž se statisticky analyzují data, která mají vliv na provoz a dle zjištěných výsledků se přistupuje k plánované údržbě a výměně dílů před ukončením jejich provozního života. Posledním přístupem k provádění údržby je korektivní (reaktivní) údržba, ke které se přistupuje v případě objevu poruchy. Cílem údržby je optimální využití a případné prodloužení doby života zařízení, zlepšení provozní bezpečnosti a snížení počtu poruch. Také usnadňuje plánování nákladů na provoz zařízení. [2; 4; 24]

TZ jsou během provozu vystavena různým zatížením, vysokým teplotám a dalším vlivům prostředí, které vedou ke zhoršení požadovaných vlastností. Se znalostí typů a příčin degradačních procesů je možné zabránit jejich výskytu, popřípadě šíření. Zhoršení vlastností materiálu, vznik defektů a vad může být způsobeno již v procesu výroby, což se může projevit na vzniku nekvalitních svarových spojů (nevhodné zvolení parametrů svařování, chybou operátora, ...) nebo během provozu spolupůsobením napětí, teploty a dalších vlivů prostředí. Často se vyskytující procesy vedoucí k nežádoucím změnám vlastností jsou únavové opotřebení, napadení korozí, nebo creepem (tečením). [2; 4; 24]

Poškození zařízení bývá způsobené selháním materiálu, kdy je dosažen tzv. mezní stav, při kterém vznikají trvalé plastické deformace, je porušena soudržnost materiálu atp. Proto je důležitou součástí kontroly zařízení, jak bylo řečeno v kapitole 1.1, určení zbytkové životnosti, což je doba, která zbývá do konce spolehlivého provozu komponenty. Důležité body v procesu posuzování zbytkové životnosti jsou viz obrázek 4. Pro provozovatele je nesporně výhodnější upřednostňování metod nedestruktivního zkoušení všude tam, kde je to možné, a to z důvodu kratších odstávek (neboť nejsou extrahovány vzorky, oprava je provedena jen na poškozeném zařízení) a jsou uspořeny náklady jak na samotnou kontrolu, tak za kratší odstávku. [2; 4; 24]



Obrázek 4 - Proces posuzování zbytkové životnosti [4]

## 2 Vysokoteplotní degradační procesy

### 2.1 Hlavní degradační procesy v energetice

Vlivem procesů postupného, trvalého a nevratného znehodnocování požadované úrovně vlastností materiálu, dochází k tzv. degradaci. Ta může snížit spolehlivost a životnost zařízení, v mezním případě může způsobit úplné selhání jejich funkce. Rozlišovány jsou dva druhy degradace, a to výrobní a provozní. Pojem výrobní degradace se používá v případě, kdy ke zhoršení některých vlastností materiálu, vzniku vad apod. v porovnání s technicky požadovaným, nebo předepsaným stavem, dochází již v procesu výroby. Příčinami mohou být nedodržení parametrů výroby, nevhodně zvolené parametry svařování, montážní nedostatky, tepelné ovlivnění atd. Typicky se jedná o vlivy:

- Tepelné zpracování
- Svařování

Převládající činitelé jsou pak odpovědní za mechanismy degradace, kterými jsou především:

- Creep
- Opotřebení
- Vysokoteplotní koroze

#### 2.1.1 Tepelné ovlivnění

##### Tepelné zpracování

Materiály musí být navrhovány pro příslušné provozní teploty, protože mechanické vlastnosti materiálů jsou teplotně závislé. Toto chování je využíváno ve výrobě, zejména u tepelného zpracování (dále jen TeZ), kdy jsou prováděny cílené změny ve struktuře kovu, a tím jsou zásadním způsobem ovlivňovány jeho užité vlastnosti.

Rozdělení tepelného zpracování může být na tři etapy [6; 25]:

- ohřev na teplotu,
- výdrž na dané teplotě,
- ochlazování vhodnou rychlostí.

Existují dvě skupiny TeZ, a to s překrystalizací a bez překrystalizace.



Během TeZ s překrystalizací dochází k změně fáze, tj. u ocelí k přeměně původní struktury na austenit a nové krystalizaci zrn. Rozlišujeme homogenizační žíhání, normalizační žíhání a kalení. Ohřev je u žíhání pomalý (cca 150 °C/hod), prodleva na teplotě 1-5 min a následuje ochlazení, optimálně v uzavřené peci až do teploty 200 °C, kdy se ochlazuje na vzduchu. Kalení je proces, kdy ocel získává vysokou tvrdost, odolnost proti otěru, ale vzniklá struktura má vysoké vnitřní pnutí, která je vyvolána nadkritickou rychlostí ochlazování. [6; 25]

**Homogenizační žíhání** – se používá u výchozích ingotů, velkých odlitků a slouží k vyrovnání heterogenity chemického složení napříč ocelovým výrobkem, teplota se pohybuje okolo 1200°C. [6; 25]

**Normalizační žíhání** – je používáno pro svary v rámci PWHT, a to k odstranění heterogenity struktury a zjemnění zrna. Díky tomu vznikne struktura se stejně velkými zrny, která jsou menší, než poměrná část původních zrn a výsledná struktura získá požadované rozložení fází. Teplota se pohybuje 20-50 °C nad křivkou Ac3<sup>2</sup>. [6; 25]

**Kalení** – často se používá jako součást zušlechťování. Při tomto procesu dochází k ohřevu cca nad 50 °C nad křivku Ac3, výdrži a následnému prudkému ochlazení. Kalení je pro ocel nejtypičtější způsob tepelného zpracování, jehož cílem je dosažení výsledné martenzitické nebo bainitické struktury, které jsou velmi pevné a tvrdé. Martenzitický struktura vzniká rychlým ochlazením austenitu, čímž je ve struktuře zabráněno pohybu atomů a vzniká tak přesycený tuhý roztok uhlíku v železe  $\alpha$ . Tyto struktury jsou pouze podmíněně svařitelné a vyžadují před svařováním předehřev, aby bylo zabráněno vzniku trhlin za studena. [6; 26; 25]

U TZ bez překrystalizace dochází pouze k zotavení a rekrystalizaci stávajících zrn a probíhá pod teplotou A1 (727 °C). Z toho důvodu nemůže dojít k tvorbě nových fází. K tomuto TeZ je řazeno především žíhání ke snížení vnitřních pnutí, rekrystalizační žíhání, žíhání na měkko, rozpouštěcí žíhání, stabilizační žíhání a popouštění. [6; 25]

**Žíhání ke snížení vnitřních pnutí** – Slouží k snížení vnitřních pnutí vyvolaných technologií výroby na přijatelnou úroveň. Používá se obvykle u uhlíkových ocelí, pro výkovky, odlitky a svary v rámci PWHT. Proces probíhá za teplot 620–650 °C. [6; 25]

**Rekrystalizační žíhání** – odstraňuje deformačně zpevněnou strukturu, vzniká nová, rekrystalizovaná struktura s novými zrny. Teplota se nachází nad teplotou rekrystalizace, pro

---

<sup>2</sup> Křivka Ac3 se nachází v binárním diagramu Fe-Fe<sub>3</sub>C, blíže je toto téma rozpracováno v [25]

uhlíkové oceli cca 550–700 °C. Je to minimální teplota, za které dochází k obnově rovnovážného stavu krystalů a materiál nabývá svých původních vlastností, tedy i původní tvařitelnosti. [6; 25]

**Žihání na měkko** – je využíváno pro zlepšení obrobiteľnosti. Teplota se pohybuje těsně nad A1, typicky se používá pro nadeutektoidní oceli s vysokým obsahem uhlíku. [6; 25]

**Rozpouštěcí žihání** – účelem je tvorba struktury, jež bude odolná proti mezikrystalové korozi do cca 350 °C. Proces probíhá za teploty cca 1030 °C, což je rozpouštěcí teplota karbidů. Karbidy jsou problematické tím, že na sebe váží chróm, obsažený v slitinách korozivzdorných materiálů. Díky tomu dochází ke snížení jeho koncentrace pod 11,5 % (koncentrace nutná pro zajištění korozivzdorného účinku vznikem pasivační vrstvy Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). [6; 25]

**Stabilizační žihání** – účelem je rovnoměrné rozložení karbidů ve struktuře materiálu, probíhá za teplot 800-900 °C. Účelem je zpevnění materiálu tvorbou překážek pohybu dislokací. [6; 25]

**Popouštění** – následuje bezprostředně po kalení, nebo normalizačním žihání a je součástí procesu zušlechťování ocelí. Pomocí něj je zvyšována houževnatost (a snižována pevnost) materiálu. Rozlišováno je nízkoteplotní popouštění (150-400 °C) a vysokoteplotní popouštění (400-700 °C). [6; 25]

### Svařování

Dalšímu tepelnému ovlivnění, kterému je materiál vystaven při výrobě, je svařování. Svařování je hlavní mechanismus spojování materiálů v nerozebíratelný celek. Jedná se také o tzv. speciální proces, který vyžaduje verifikaci pro ověření splnění požadavků, které na něj byly kladeny. Z toho důvodu velmi záleží na správném zvládnutí procesu svařování, neboť jestliže není vhodně provedeno, hrozí změna struktury nežádoucím způsobem (čímž dojde ke zhoršení mechanických vlastností), tvorba vad atd.

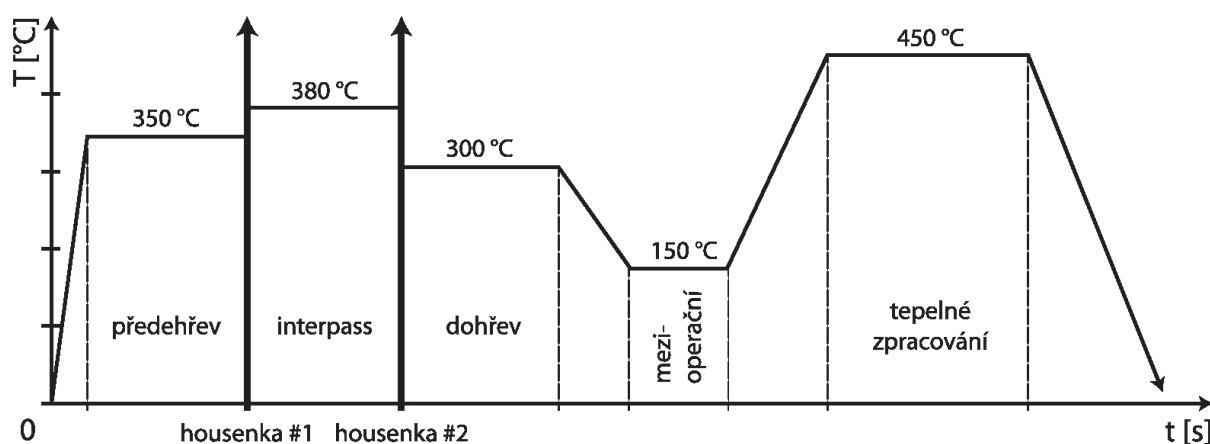
Během tavného svařování dochází působením soustředěného zdroje tepla ke krátkodobému, ale intenzivnímu ohřevu materiálu v okolí místa svařování na vysoké teploty. Vnesené teplo je dáno tzv. hlavními svařovacími parametry, kde pro obloukové svařování platí:

$$Q = \frac{I \cdot U}{v} \cdot 10^3 \quad (2.1)$$

Během svařování vnesené teplo natavuje malý objem materiálu a vlivem tepelné vodivosti dochází k ohřevu také okolní oblasti základního materiálu (vzniká tzv. tepelně ovlivněná oblast – TOO). To má za následek fázové přeměny, fyzikálně-chemické reakce, změny struktury a změny objemu, které způsobují vnitřní napětí a deformace ve svarovém spoji. Velikost těchto změn závisí na rozměrech základního materiálu, jeho fyzikálních vlastnostech a chemickém složení, hodnoty změny objemu závisí na technologii svařování. [6]

Během svařování prochází svařovaná součást teplotním cyklem, který udává změnu teploty v čase v daném místě svarového spoje, a především v TOO. Ten je definován [6]:

- časem ohřevu na maximální teplotu,
- rychlostí ohřevu,
- maximální teplotou cyklu,
- dobou výdrže na konkrétní teplotě,
- rychlostí ochlazování.



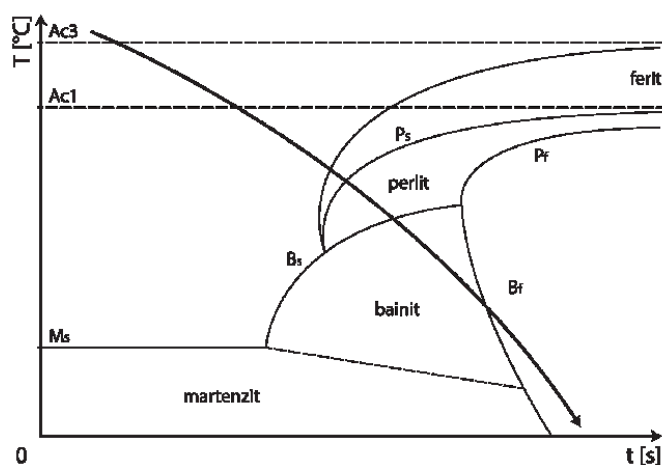
Obrázek 5 - Etapy teplotního cyklu [6]

Etapy teplotního cyklu, viditelné viz obrázek 5 výše:

- **Předehřev** – může podstatně zlepšit kvalitu svarového spoje tím, že umožňuje snížit teplotní gradient (spád). Pomáhá zabránit vzniku strukturních fází základního charakteru a nežádoucích zbytkových pnutí v materiálu.
- **Dohřev** – je prováděn bezprostředně po ukončení svařovacích operací. Dohřevem je odstraňován atomární vodík difundující z oceli, snižuje se náchylnost k žíhacím trhlinám (300 °C), poté následuje ohřev na mezioperační teplotu (150 °C) a žíhání.
- **Mezioperační teplota** – Maximální hodnota teploty předehřevu je dána touto teplotou, která by měla zabránit nadměrnému zhrubnutí zrna v TOO.

- PWHT – je kontrolovaný proces, při kterém se svařený materiál ohřeje na určitou teplotu, následuje výdrž po specificky určenou dobu a kontrolované ochlazování. Jak již bylo zmíněno, v tomto případě se používá žíhání na snížení vnitřních pnutí. [27]

Podstatnými časy chladnutí jsou časy polymorfních přeměn v oblasti zvýšené stability austenitu  $\Delta t_{8/5}$  (T v rozmezí 800-500 °C) a teploty v oblasti difuze vodíku  $\Delta t_{3/1}$  (300-100 °C). Parametr ochlazování  $\Delta t_{8/5}$  vyjadřuje teplotní interval, během kterého se ochladí dané místo svarového spoje z 800 °C na 500 °C, hodnota parametru zásadně ovlivňuje, ve sledovaném místě, výslednou strukturu. Rychlost ochlazování svarového spoje v tepelně ovlivněné oblasti se řídí předehřevem, kterou lze stanovit z diagramu ARA, viz obrázek 6, orientačně dle tloušťky stěny, obsahu uhlíku atp., nebo výpočtem pomocí parametrických rovnic. [6]

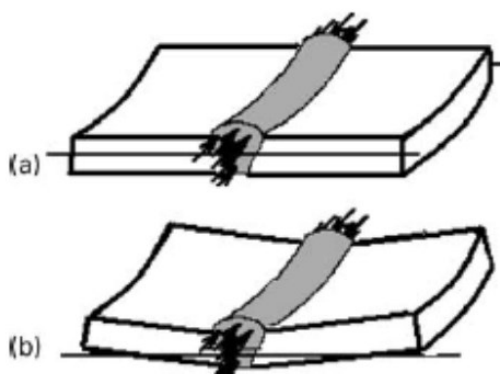


Obrázek 6 - Diagram ARA

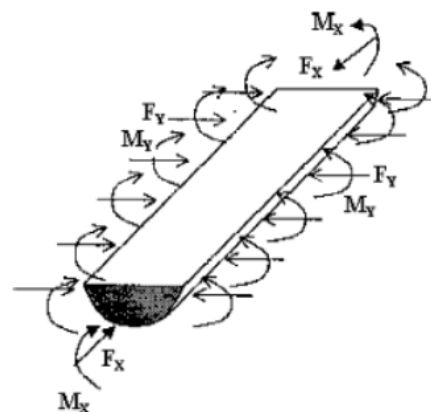
U tavného svařování se dosahuje vytvoření svarového spoje krystalizací svarového kovu. Krystalizace začíná při poklesu teploty pod teplotu likvidu. Dochází zde k likvačním procesům, jež jsou řízeny chemickým složením svarového kovu a v TOO chemickým složením základního materiálu, parametry a metodou svařování, součástí těchto procesů jsou likvační trhliny, jež vznikají v průběhu svařování mechanismem natavení škodlivých směsí fází, především v TOO svarového spoje. Dále krystalizaci doprovází segregační procesy, při kterých dochází ke vzniku nerovnoměrného složení (ať vlivem nečistot nebo příměsí) ve výsledné struktuře, vlivem nerovnoměrného tuhnutí. Segregační procesy lze omezit homogenizačním žíháním, jež bylo zmíněno v předchozím textu. [6]

Svařováním vznikají plastické deformace, mění se tvar zrn a orientace mřížky a dochází ke změnám mechanických vlastností kovu. Příčné ohybové deformace jsou schematicky znázorněny viz obrázek 7. V případě, že je konstrukce svařována, přivádí se do místa svaru

teplo určené k natavení spoje a tím je způsobeno nerovnoměrné rozložení teploty. Výsledkem nerovnoměrného zvýšení teploty a napětí jsou plastické deformace, které zůstávají po teplotním cyklu trvale přítomny v okolí svarového spoje. Obrázek 7a zobrazuje příčné napětí, které může nastat, když poměr délky plechu k šířce je dostatečně velký. Jakmile tento poměr klesne, je plech vystaven dvěma druhům deformace, příčné i úhlové, jak je znázorněno viz obrázek 7b. Pro malé tloušťky plechů nejsou úhlové deformace významné z důvodu vysoké homogenity teplotního pole. V některých případech jsou síly působící proti podélnému smrštění, viz obrázek 8, dominantnější a způsobují zakřivení v důsledku nízké tuhosti tenkého plechu. [28; 6]



Obrázek 7 - Schéma deformace svaru (a) - podélná, (b) - úhlová [28]



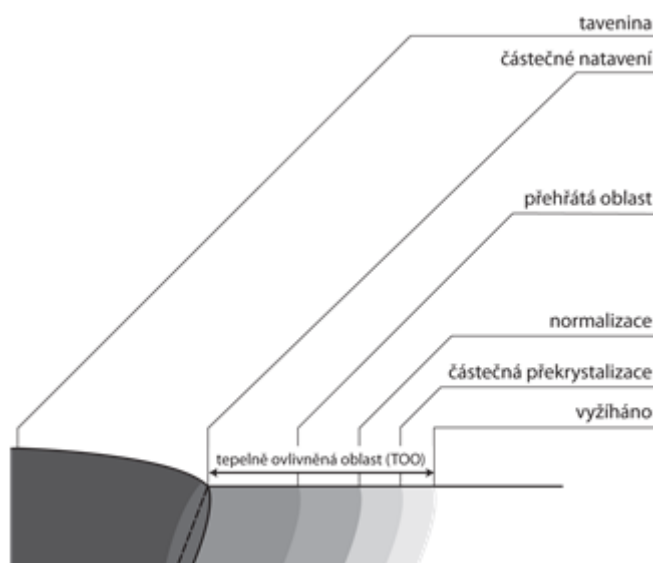
Obrázek 8 - Předpokládané smrštění v oblasti svaru [28]

Se vzniklými plastickými deformacemi roste vnitřní energie kovu. Tu lze snížit následným ohřevem tak, aby došlo k difuzním mechanismům, jež vedou k tzv. odpevňovacím mechanismům. Rozlišovány jsou dva děje, a to zotavení (tj. zánik mřížkových deformací a napětí) a rekrytalizace (vznik zárodků a růst nových zrn). Oba děje jsou závislé na teplotě a na stupni předchozího tváření. Vzorek v takovém případě však již nemění svůj tvar. [29; 6]

Při svařování dochází ke změnám mikrostruktury v důsledku působení tepla v oblasti základního materiálu bezprostředně přiléhajícímu k oblasti svarového spoje, nazývané tepelně ovlivněná oblast. TOO a přilehlé oblasti jsou rozděleny na charakteristická pásma, vyskytující se v každém svarovém spoji. Těmi jsou:

- tavenina (oblast svarové lázně),
- částečné natavení (oblast kontaktu svarové lázně se základním materiálem),
- oblast přehřátí (oblast, ve které se zhrubuje zrna materiálu, nad 1147 °C pro oceli, dochází ke zkřehnutí struktury),
- normalizace (úplná transformace struktury, nad teplotou křivky  $A_{c3}$ ),

- částečná překrystalizace (mezi křivkami Ac3 a Ac1),
- vyžíhaná oblast (do cca 550 °C),
- a zbylý, neovlivněný základní materiál.



Obrázek 9 - Tepelně ovlivněná oblast [6]

Šířka jednotlivých pásem znázorněných viz obrázek 9 je rozdílná pro různé technologie svařování a je závislá na množství vneseného tepla (použitá technologie svařování) a svařovaném materiálu (jeho tepelné vodivosti) – viz rovnice (2.1). I v pásmu, kde nebyla část základního materiálu natavena, dochází vlivem vneseného tepla ke strukturním změnám, proto vady svarových spojů mohou vzniknout nejen v natavené oblasti, ale také v TOO a přilehlém základním materiálu. [6]

### Provozování zařízení

Při provozování zařízení v energetice, v petrochemickém procesu atp., je klíčová stabilní dodávka energie, zdrojem této energie je přehřátá pára.

Výstupní teplota přehřáté páry je od 250 °C do 600 °C, u průtočných kotlů s nadkritickým tlakem bylo dosaženo až 650 °C. Konkrétní hodnota výstupní teploty páry je funkcí tlaku páry. Kotle na vysoké parametry páry dosahují tlaků nad 14 MPa a teplot 565 °C. Se zřetelem na citlivost legovaných ocelí vůči rychlým změnám teploty, je u vysokých teplot velký nárok na přesnost dodržování výstupní teploty přehřáté páry, aby nedocházelo ke snížení životnosti jednotlivých částí zařízení. [30; 31]

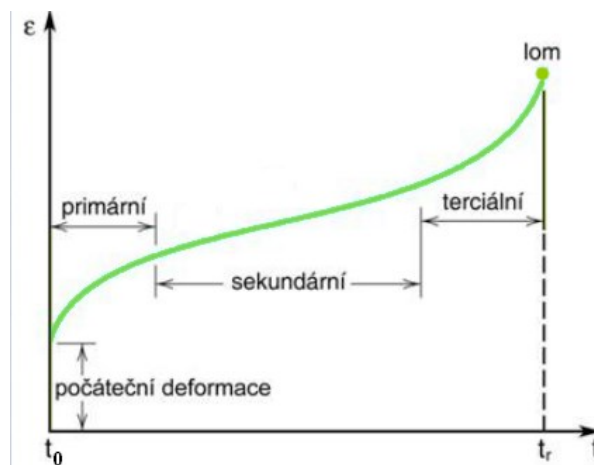
Provozní teploty dosahují hodnot, které pro uhlíkovou ocel překračují hranici zotavení i rekrystalizace. V důsledku může docházet ke změnám struktury vůči původnímu dodanému

stavu. Materiál musí být navržen tak, aby výsledná struktura splňovala požadavky na provozní zatěžování.

### 2.1.2 Tečení (creep)

V případě, že je při zvýšené provozní teplotě (typicky  $>350\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) materiál vystaven po dlouhou dobu mechanickému napětí i s hodnotami pod mezí kluzu  $R_e$ , postupně u něj dochází k makroskopické plastické deformaci, která se nazývá tečení (creep) a je funkcí napětí, času a teploty. Tento proces vede k degradaci struktury a postupnému šíření kavit až k celkovému porušení součásti. V praxi musí být každý materiál vystaven takové kombinaci teploty a namáhání, aby proces tečení neohrozil jeho funkci. Vliv vysokých teplot se projevuje i na jiné vlastnosti – oxidaci (dáno zvýšenou chemickou aktivitou) a také únavu (creep zpravidla působí na urychlení únavového procesu). [32; 33; 34]

Materiál v pevné fázi má tendenci se trvale (plasticky) deformovat při působení zvýšené teploty  $T$  a mechanického napětí  $\sigma$  po určitou dobu  $t$  a jedná se tak o vysokoteplotní, dynamický proces. Chování materiálu při tečení ( $\sigma=\text{konst.}$ ,  $T=\text{konst.}$ ), které se obvykle popisuje pomocí závislosti poměrného prodloužení na čase, je na křivce vysokoteplotního tečení rozděleno do čtyř oblastí, viz obrázek 10. [32; 33; 34]



Obrázek 10- Křivka tečení

Pro splnění požadavku pro vznik tečení je zapotřebí působení napětí po určitou dobu, které vyvolá určitou minimální počáteční deformaci. Další část je rozdělena na tři stádia creepu a lom:

- **Neustálené tečení** (primární, přechodové) – dochází k poklesu rychlosti deformace způsobené zvýšením hustoty dislokací, při současném vzniku nízkoúhlových hranic zrn a vzniku subzrn. [24; 1]

- **Ustálené tečení** (sekundární) – toto stádium má často nejdelší trvání,  $\dot{\epsilon}_s$  rychlost tečení je v něm téměř konstantní. Ustálení rychlosti tečení je způsobeno ustálenou dynamickou rovnováhou mezi zpevňovacími a odpevňovacími procesy. Rychlost tečení  $\dot{\epsilon}_s$  je dána vztahem:

$$\dot{\epsilon}_s = C \cdot \left(\frac{\sigma}{G}\right)^n \cdot e^{-\frac{Q_c}{kT}} \quad (2.2)$$

kde  $C$  a  $n$  jsou parametry závislé na materiálu,  $G$  modul pružnosti ve smyku,  $Q_c$  aktivační energie tečení. Parametr  $n$  je pro oceli  $<2,15>$ ,  $Q_c = (250 \div 650)$  kJ/mol. Již v této fázi mohou vznikat kavity, které se v terciální fázi tečení dále propojují. [24; 1]

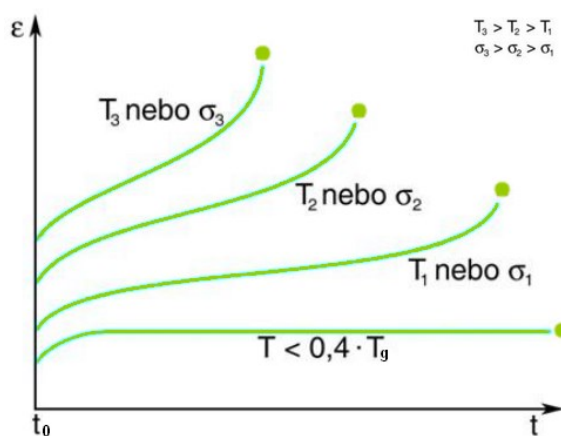
- **Zrychlené tečení** (terciální, nestabilní) – terciálnímu tečení předchází procesy poškození v důsledku strukturních změn, tvorby a propojování kavit, dutin, vnitřních trhlin atd. Je charakterizováno dvěma souběžnými procesy, kdy jeden je spojen s tečením kovu, který degraduje mechanické vlastnosti dané součásti. Další s narůstáním plastické deformace a propojování (koalescenci) kavit. Tím, že se rychlost deformace postupně zvyšuje vlivem zvýšeného napětí (v souvislosti se zúžením průřezu v důsledku lokálních poruch soudržnosti), dochází k prokluzům celých zrn podél jejich hranic, čímž se inicializují další poškození, dochází k jejich hromadění a následně dochází k plastickému kolapsu součásti, který je viz obrázek 10 znázorněn jako bod  $t_r$ . [24; 1; 35]

Obrázek 11 znázorňuje křivku tečení pro různá napětí a teploty. S rostoucí provozní teplotou, nebo zvyšujícím se napětím, které na součást působí, se zvětšuje i celková deformace a dochází ke zkrácení doby do lomu. Při nízkých teplotách a napětích se objevuje přechodné tečení (křivka  $T < 0,4 \cdot T_g^3$ ), které rychle mizí a počáteční hodnota rychlosti tečení se stále snižuje. [34; 35]

---

<sup>3</sup> Mezní teplotu  $T_g$ , pro daný materiál vyznačuje průsečík minimální hodnoty meze kluzu  $R_e$  ( $R_{p0,2}$ ) a časové pevnosti při tečení  $R_{mT/T/t}$ . Více o tomto tématu v [36], kapitola 1.





Obrázek 11- Křivka tečení pro různé teploty a napětí

Při použití pro konstrukci zařízení pro energetický průmysl, tj. rozvodů páry, parních a plynových turbín, přehříváků páry a dalších, je základním požadavkem na materiály zachování určitých mechanických vlastností při provozní teplotě, viz 2.1.1. Mezi požadavky na materiály můžeme zařadit vysokou dlouhodobou pevnost při tečení, vysokou mez kluzu a pevnost v tahu, dobré technologické vlastnosti, žáruvzdornost atd. Při zohlednění všech požadavků, jsou nejvhodnějšími materiály žáropevné či žáruvzdorné oceli a slitiny. Žáropevnost je schopnost materiálu dlouhodobě přenášet vnější namáhání za podmínek tečení, aniž by došlo k výrazné plastické deformaci. Žáruvzdorné materiály jsou vždy také žáropevné. [36]

### 2.1.3 Koroze

Koroze je změna vlastností materiálu vlivem chemických, nebo fyzikálně-chemických dějů. Jedná se často o nežádoucí jev, který způsobuje postupné snižování užitečných vlastností materiálu, čímž se zmenšuje pevnost konstrukčních součástí. [6]

Podle charakteru probíhajících dějů se standardně koroze dělí na chemickou, kde je zařazena koroze v plynech a nevodných kapalinách, a elektrochemickou, která probíhá v elektrolytech. Avšak modernější způsob dělení, je dle poznatků z výzkumu koroze dle prostředí, na korozi v elektricky nevodivých prostředích (nevodné kapaliny, redukující či oxidující plyny) a na korozi v elektricky vodivých prostředích (v atmosféře, půdách, vodných roztocích elektrolytů atp.). [33; 35]

Koroze kovů v elektricky nevodivých prostředích může být vyvolána plyny působícími oxidačně ( $O_2$ ,  $CO_2$  apod.) nebo redukčně ( $H_2$ ,  $N_2$ ,  $CO$  a další). Ze všech plynů je nejvýznamnější kyslík, protože je jednou z hlavních složek vzduchu, navíc rychlost oxidace je

teplotně závislá, a proto významná především za vysokých teplot. Další text je tedy zaměřen na působení oxidace na konstrukční materiály. [6]

Charakteristickým rysem oxidace je vznik korozních produktů (oxidických vrstev) na povrchu kovu, ty mohou mít rozličné vlastnosti. V případě, že má vrstva špatnou přilnavost k základnímu kovu (odprýskává, je porézní), probíhá reakce přibližně konstantní rychlostí. Platí např. pro železo nebo titan za vysokých teplot (1000 °C), kdy při dané teplotě nejsou příliš odolné. Oproti tomu, pokud je vrstva oxidu kompaktní a transport atomů kovu probíhá přes stále silnější vrstvu, rychlost oxidace se postupně snižuje. Tomuto procesu se říká pasivace a je hlavní mechanikou ochrany kovů proti pokračující korozi.

Materiály, pro které je korozní ochrana na principu pasivace povrchu charakteristická, jsou oceli legované chromem a řadou dalších prvků (Ni, Mo, Ti, Cu,...), ty se z korozního hlediska dělí na tři skupiny – chromové (feritické a martenzitické), chromniklové austenitické a dvoufázové (duplexní, austeniticko-feritické). Nejpoužívanějším typem korozivzdorné oceli jsou austenitické oceli, pokrývají téměř 70% celé produkce korozivzdorných ocelí. Použití mědi a jejich slitin, olova, hliníku je v protikorozní ochraně významné, ale je vázáno specifickými podmínkami a není dostatečně univerzální. [37]

Rychlost oxidace je teplotně závislá a významná z hlediska degradačních procesů je především při vysokých teplotách. [33; 35] Materiály, které odolávají oxidaci i za vysokých teplot, mají typicky vyšší koncentraci těchto legujících prvků a nazýváme je žárovzdorné (např. AISI 304L, typické složení 8–12 % Ni, 18-20 % Cr, 2 % Mn max, 1 % Si max, 0,03 % C max). Odolnost proti vysokoteplotní oxidaci je způsobena tvorbou vrstev obsahujících krom oxidů železa, oxidy uvedených prvků (především pak  $Cr_2O_3$ ). [33; 35]

U korozivzdorných materiálů se nejčastěji projevuje mezikrystalová koroze, jejíž příčinou je strukturní a chemická nehomogenita kovu na hranicích zrn. Tato koroze vzniká např. při svařování, kdy na hranicích zrn dochází v důsledku tvorby karbidů bohatých na chrom ke vzniku oblastí, jež jsou o chrom ochuzeny a korodují přednostně. Dalším významným typem koroze u korozivzdorných ocelí je koroze selektivní a dochází při ní k rozpouštění méně ušlechtilého kovu slitiny, jehož přítomnost ve slitině je však žádoucí. Např. u výše zmíněné oceli AISI 304L může docházet k rozpouštění manganu. [38]

Koroze za vysokých teplot vzniká zejména u parních turbín, parovodů, přehříváků, dieselových motorů, nebo dalších zařízení přicházejících za vysokých teplot do kontaktu s plyny obsahující kyslík. Nejčastěji se projevuje úbytky původního materiálu a vzniku oxidu

na jeho povrchu, což vede ke snížení průřezu součásti, k zanášení a usazování uvolněných částic a jejich abrazivnímu působení na vnitřní povrchy. [35; 33; 39]

#### 2.1.4 Únava

Změna vlastností materiálů, která vede ke z vzniku a růstu trhlin, až k porušení vlivem cyklického namáhání (dynamického zatěžování) je nazýváno únava. Cyklické namáhání se projevuje opakujícími se změnami zatížení součásti, které mohou mít charakter mechanický, tepelný anebo kombinovaný. Významnými charakteristikami cyklu jsou horní napětí  $\sigma_h$  a rozkmit napětí  $\Delta\sigma = \sigma_h - \sigma_d$ . Počet cyklů do lomu  $N$  udává pro různá zatížení křivka závislosti  $\sigma$ - $N$ , která se nazývá Wöhlerova (únavová) křivka. [6; 33]

Příčinou únavového poškození materiálů jsou nevratné změny, které jsou způsobeny cyklickou plastickou deformací u nízkocyklové únavy a makroskopicky elastickou deformací u vysokocyklové únavy. Při určení cyklů do lomu pomocí výše zmíněné křivky, je očekávána určitá doba k iniciaci trhliny a dále doba, kdy bude docházet k jejímu stabilnímu šíření. Toto je typické u termodynamicky zatěžovaných konstrukcí jako jsou kotle, netopené tlakové nádoby i přiřazené systémy konstrukcí a potrubí, rotory parních či plynových turbín. [6; 33]

Na únavovou životnost má vliv především kvalita povrchu. Zvýšení meze únavy docílíme jak omezením přítomnosti míst, kde by mohla únavová trhlina vzniknout (ostré vruby, nedokonalé svary, vměstky atd.), tak vnesením tlakového pnutí do povrchové vrstvy, např. kuličkováním nebo povrchovým kalením. Vliv má ale také struktura a její mechanické vlastnosti. Snahou je také vyvarovat se velkému množství svarů a také podélným svarům, jež jsou namáhány více, než svary obvodové [6; 33]

#### 2.1.5 Opotřebení

Nežádoucí změny povrchu a jeho rozměrů vlivem kontaktu s povrchem jiného materiálu, s tvrdými částicemi, nebo médiem nazýváme opotřebení. Podle typu materiálu nebo média rozlišujeme několik druhů opotřebení, ze kterých je zmíněno erozivní a kavitační opotřebení, s nimiž je možno se setkat právě u tlakových zařízení, jako jsou kolena armatur, čerpadla, lopatky parních i vodních turbín atd. Dále je rozlišováno opotřebení vibrační, abrazivní, adhezivní a únavové.

##### Erozivní opotřebení

O erozivním opotřebení hovoříme v případě, že je povrch poškozován pevnými částicemi nesenými proudem kapaliny nebo plynu, nebo i přímo daným médiem, kdy je poškození

způsobeno zejména vysokou kinetickou energií unášených částic dopadajících na povrch součástí. S tímto opotřebením se setkáváme například u potrubí, když při údržbě dochází k přerušovanému běhu zařízení a médiem jsou unášeny částice korozních produktů.

### Kavitační opotřebení

V proudících kapalinách vzniká kavitační opotřebení, a to v místech, kde dochází k vzrůstu rychlosti proudění a klesá tlak kapaliny pod tenzi nasycených par. Vznikají tak parní bubliny, které v místech s vyšším tlakem opět zanikají, což je doprovázeno hydrodynamickými rázy poškozující povrch materiálu. Tento jev může nastávat např. u potrubí zanášených korozními produkty, kde podle Bernoulliho rovnice dochází k lokálnímu zrychlení proudění. [6; 24]

## **2.2 Detekce degračních stavů**

Se stále zvyšujícími se nároky na materiál je nerozlučně spjata i zkoušení materiálů, které slouží ke kontrole jakosti, a to jak formou dodržení mechanických vlastností, tak i požadavků na tvar a rozměr atd. Výchozí hodnoty jsou stanoveny ve smlouvě dané zakázky, příslušných výrobních normách, nebo přiložených technických podmínkách. Existují dva základní typy zkoušek, a to zkoušky destruktivní a nedestruktivní.

Destruktivní zkoušky jsou nejčastěji využívány pro zjišťování mechanických vlastností. Tyto zkoušky jsou prováděny na zkušebních vzorcích odebraných z materiálu, který už nebude navrácen do výroby či provozu. Jelikož je zkouška nenávratným procesem, vychází se z předpokladu, že pokud všechny zkoušky kontrolovaných vzorků vyhovovaly požadavkům stanoveným ve výše zmíněných dokumentech nebo související průvodní dokumentaci, tak je možné zaručit stejně kvalitní výsledky i u dalších kusů. Tento předpoklad je zaručen v případě, že budou přesně dodržovány všechny technologické podmínky a typicky tak lze předpokládat např. při sériové automatizované výrobě. V případě provádění destruktivních kontrol na provozovaných zařízeních musí být vyjmutá součást nahrazena novou, což klade zvýšené požadavky na finance i dobu probíhajících odstávek. Zkoušky se provádí v příslušné laboratoři, jež je vybavena zkušebními přístroji. [40]

Mezi nejběžnější metody jsou zařazeny:

- Statická zkouška tahem – slouží pro stanovení meze pevnosti, meze kluzu, tažnosti atd.

- Zkouška rázem v ohybu – určení přechodové teploty, tj. teplota pod níž se materiál chová křehce. Nad touto teplotou má lom tvárný charakter.
- Zkouška tvrdosti – zjištění tvrdosti a případně zprostředkovaně i meze pevnosti materiálu.
- Zkouška ohybem – zkouška lámavosti – určena pro posuzování plastických vlastností materiálů, jako ne např. tažnost.

Nedestruktivní zkoušení (NDT) se využívají v různých průmyslových odvětvích i různých etapách výroby, jako kontrola materiálů a polotovarů, výsledků různých výrobních činností (slévání, svařování, tepelné zpracování apod.), a také během provozu nebo při plánované údržbě. Pomocí metod NDT lze ověřovat přítomnost trhlin nebo jiných diskontinuit, ale i odhalovat lokální změny struktury, či změny v jakosti povrchu. Dále je možné zjišťovat tloušťku materiálů či nátěrů. Cennou schopností metod NDT je, že zahrnuje metody pro zkoušení, které nenarušují budoucí použitelnost zkoušeného dílu a ten je tak možno vrátit do výroby či provozu. [1; 41; 42]

V případě nedestruktivních zkoušek se jedná o metodu nepřímou, tzn. interpretují se a hodnotí zkoušením získané indikace. Výjimkou je vizuální metoda (VT), pomocí které jsou hodnoceny konkrétní vady. Dalšími známými metodami jsou [6; 41]:

- zkoušky ultrazvukem,
- kapilární metoda,
- metoda magnetická prášková,
- metody vířivých proudů
- a další, méně často využívané NDT metody.

Faktorů limitujících NDT metody existuje mnoho. Jednotlivé metody jsou různě náročné na technické vybavení, i na kvalifikaci personálu a nelze stanovit jeden obecně platný postup pro hodnocení indikací. Využití konkrétní metody vždy závisí na dané situaci. Obvykle se v praxi používá kombinace několika různých metod a postupů, které umožňují zjistit co nejpřesnější výsledky. Např. pokud je požadováno u feromagnetického materiálu zjistit plošné trhliny, pravděpodobně bude zvolena magnetická zkouška, pro hliník by byla zvolena metoda kapilární. [6; 43]

Svá omezení má i metoda ultrazvuku, jež je využita pro experimenty v této práci. U konvenční ultrazvukové metody se jedná např. o orientaci a typ vady. To vedlo k rozvoji dalších technik zejména TOFD a Phased Array. Pro techniku TOFD je limitující velikost zrna

zkoušeného materiálu, nehodí se také pro určování indikací ležících blízko povrchu, protože echo od přítomné vady může být skryto echem od laterální vlny. Dle dostupné literatury je pro metodu Phased Array zatím největší nevýhodou vysoká pořizovací cena zařízení a vysoké nároky na pracovníka. Zmíněna je také časově náročnější kalibrace v porovnání s konvenčním ultrazvukem. Dále je vhodné techniku PA doplnit technikou TOFD, nebo konvenčním UT, důvodem je komplexní získání dat. Technika PA nezachytí např. vady kolmé k povrchu bez kontaktu s povrchem, vady plošné rovnoběžné s povrchem atp. [43; 44]

### **3 Detekce tepelného ovlivnění ultrazvukovou metodou**

#### **3.1 Obecný popis ultrazvukového vlnění**

Testování pomocí ultrazvuku je nedestruktivní metoda, při které je využíváno ultrazvukové mechanické vlnění o vysoké frekvenci (nad 20 000 Hz), šířící se prostředím v důsledku jeho elastických vlastností. Pro vysílání, přijímání a zpracování signálů ultrazvuku slouží ultrazvukový přístroj s příslušnou sondou. Tento přístroj vytváří budící impuls krátkého trvání o vysokém napětí, který vybudí mechanické kmity, s frekvencí v ultrazvukovém pásmu, v měniči sondy. Vybuzené kmity se šíří jako zvuková vlna, která se na rozhraní dvou prostředí odráží a může být opět přijata sondou. Následně se přijatý signál zobrazí ve formě echa na displeji ultrazvukového přístroje. Tohoto jevu je využíváno pro kontrolu povrchových, podpovrchových a vnitřních vad materiálu. [43]

Šíření vln probíhá vychýlením atomů a molekul pružného prostředí z jejich rovnovážné polohy. Vychýlení jedné částice z rovnovážné polohy vede k vychýlení dalších částic, což způsobuje šíření napěťové vlny. Vlny jsou rozlišovány podle způsobu vychýlení částic z rovnovážné polohy, na vlny podélné (L – longitudinal waves), příčné (T – transversal waves), povrchové vlny (Rayleighovy) a deskové (Lambovy). Následující text bude zaměřen na vlny podélné a příčné, které jsou používány při měření zvolenou technikou. [43]

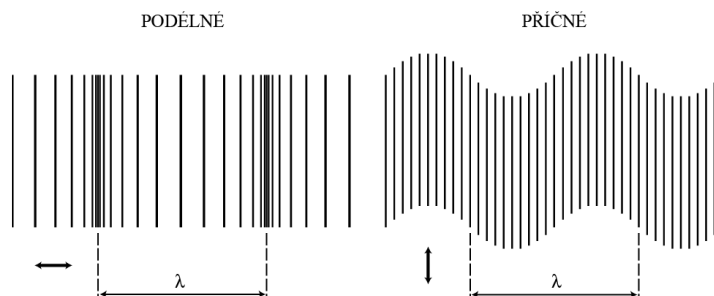
##### **3.1.1 Podélné ultrazvukové vlny**

U podélné vlny kmitají částice kolem své rovnovážné polohy ve směru šíření vlny, viz obrázek 12. Podélné vlny jsou nejpoužívanější vzhledem ke své všestrannosti, mohou se šířit v pevných, kapalných i plynných prostředích. Dochází k objemovým změnám prostředí, tj. střídavé zhušťování a zředování. Tyto vlny mají obecně nejvyšší rychlost šíření v materiálu. [43]

##### **3.1.2 Příčné ultrazvukové vlny**

Mluvíme-li o příčných vlnách, je směr pohybu částic kolmý na směr šíření, taktéž znázorněno viz obrázek 12. Při jejich šíření ke zhušťování a zředování nedochází, nastává pouze vzájemný příčný posuv částic. Vlnění tohoto typu se může šířit pouze v pevných látkách a kapalinách s vysokou viskozitou, jelikož pouze za těchto podmínek je možné přenášet smyková zatížení, což je základní požadavek pro šíření příčných vln. V oceli je vlnová délka příčné vlny cca poloviční než u podélné vlny, díky tomu je možné zjistit menší

reflektory než podélnou vlnou shodné frekvence. S nižší vlnovou délkou souvisí i nižší rychlost šíření příčných vln při konstantní frekvenci. [43]



Obrázek 12 - Znáznornění pohybu částic podélných (ve směru šíření) a příčných (kolmo na směr šíření) ultrazvukových vln (šipky znázorňují způsob kmitání atomů) [1]

### 3.2 Metodika poměru rychlostí ultrazvukových vln

Rychlost ultrazvuku je rychlost, kterou se zvuková vlna šíří určitým prostředím. Vzhledem k odlišným vlastnostem různých prostředí jsou pro každou látku rychlosti šíření vln odlišné. Rychlost šíření ultrazvukových vln závisí na elastických vlastnostech prostředí (modul pružnosti v tahu  $E$ , ve smyku  $G$ , a Poissonově čísle  $\mu$ ) a hustotě prostředí  $\rho$ . Z toho důvodu je rychlost zvuku materiálovou konstantou. Dle vztahu (3.1) vyplývá rychlost zvuku z určité frekvence  $f$  a délky vlny  $\lambda$ . [1]

$$c = f \cdot \lambda \quad (3.1)$$

Podle [45] rychlosti ultrazvukových vln pro obecně anizotropní materiály jsou dány:

$$c_{zz} = \sqrt{\frac{\lambda + 2\gamma + (2l + \lambda)\xi + (4m + 4\lambda + 10\gamma)\varepsilon_z}{\rho}} \quad (3.2)$$

$$c_{zy} = \sqrt{\frac{\gamma + (m + \lambda)\xi + 4\gamma\varepsilon_z + 2\gamma\varepsilon_x - 0,5n\varepsilon_y}{\rho}}$$

$$c_{zx} = \sqrt{\frac{\gamma + (m + \lambda)\xi + 4\gamma\varepsilon_z + 2\gamma\varepsilon_y - 0,5n\varepsilon_x}{\rho}}$$

Rychlost šíření nezávisí pouze na elastických konstantách prostředí, ale také na poměrech makroskopických rozměrů prostředí vzhledem k vlnové délce  $\lambda_L$  resp.  $\lambda_T$ . [46] Pro podélné



$c_L$  a příčné vlny  $c_T$  je pro homogenní izotropní prostředí možné ve zjednodušené formě vyjádřit závislost rychlosti vln na elastických vlastnostech a hustotě prostředí jako<sup>4</sup> [1; 43]:

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{(1 - \mu)}{(1 + \mu) \cdot (1 - 2\mu)}} \quad (3.3)$$

$$c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2 \cdot (1 + \mu)}} \quad (3.4)$$

Poměr uvedených rychlostí je v takovém případě závislý pouze na Poissonově čísle, viz rovnice (3.5). [47] Nárůst či pokles Poissonova čísla je vyvolán materiálovými vlastnostmi. V oblasti elastických deformací rychlost šíření podélných vln roste s rostoucím napětím, zatímco rychlost šíření příčných vln klesá. Je experimentálně prokázáno, že růst rychlosti šíření podélných vln je omezen dosažením určité kritické hodnoty deformace. [48] Po dosažení této hodnoty dochází opět k poklesu. Kobayashi [49] docílil stejného poznatku v případě příčných vln. Zmíněné chování je důsledkem nehomogenního rozložení plastické deformace a anizotropie v elastických vlastnostech, což může zahrnovat vznik bodových poruch a skluzových rovin, jež jsou odpovědné za degradaci Youngova modulu. [50] Vycházíme-li z výše uvedeného, úpravou rovnic (3.3) a (3.4), dostaneme poměr rychlostí  $c_L$  a  $c_T$ , tento poměr je závislý pouze na Poissonově čísle [1; 43; 47]:

$$\frac{c_L}{c_T} = \sqrt{\frac{2(1 - \mu)}{1 - 2\mu}} = f(\mu) \quad (3.5)$$

Za předpokladu, že rychlost šíření vln je možno definovat také vztahem  $c = s \cdot t^{-1}$ , kde  $c$  je rychlost,  $t$  je čas, za který vlnění urazilo dráhu  $s$ , můžeme (3.5) vyjádřit jako [1; 43]:

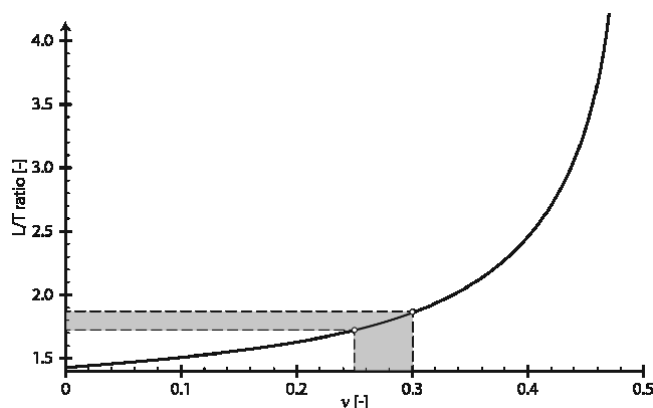
$$\frac{s_L t_L}{s_T t_T} = \sqrt{\frac{2(1 - \mu)}{1 - 2\mu}} = f(\mu) \quad (3.6)$$

Tento vztah je v úvahách o aplikaci poměru podélných a příčných ultrazvukových vln klíčový. Jak je popsáno v článku [51] o korelaci mezi rychlostí ultrazvukové vlny a Poissonovým číslem, je tak možné určit současný stav stavu deformace nepřímou. Youngův a smykový modul mají tendenci se měnit ve stejném směru, což platí pro většinu běžných

---

<sup>4</sup> Vztahy jsou platné pro součásti, jejichž základní rozměry jsou výrazně větší, než vlnová délka ultrazvukové vlny.

materiálů, a proto je změna Poissonova čísla závislá pouze na tom, jak moc budou ovlivněny jednotlivé moduly. Čím vyšší je hodnota Poissonova čísla, tím nižší je změna objemu nastávající během deformace. Obrázek 13 znázorňuje graf vztahu (3.6), pro hodnotu Poissonova čísla odpovídající konvenčním konstrukčním ocelím je znázorněna předpokládaná hodnota poměru  $\frac{c_L}{c_T}$ . [1; 48]



Obrázek 13 - Poměr  $v_{nc_L}/c_T$  jako funkce Poissonova čísla  $\mu$  pro izotropní kontinuum. (oblast hodnot pro konstrukční oceli ( $\mu = 0,25 \div 0,30$ ) značí adekvátní rozsah  $\frac{c_L}{c_T} = 1,73 \div 1,87$  [52])

Jak Zavadil prokázal ve svých pracích, při měření poměru  $\frac{c_L}{c_T}$  na laboratorních vzorcích je střední hodnota poměru v intervalu zobrazeném viz obrázek 13 a v [50] uvádí, že jsou hodnoty poměrů na neovlivněném materiálu dobře měřitelné. V [52] uvádí, že hodnoty poměrů odpovídají s malými odchylkami i stavům reálného materiálu po dlouhodobém provozování, kde nedocházelo k makroskopické deformaci. V tomto případě bylo prokázáno, že namáháním tlakem dochází ke snížení poměru  $L/T$ , při namáhání tahem jsou vykazovány vyšší hodnoty poměru. To znamená, že poměr  $L/T$  degradované struktury je, na principu srovnávacího měření, zcela jasně měřitelný.

### 3.3 Problémy současné metodiky

Dříve zmíněné experimenty uvedené v [1], [50] a [52] se potýkaly jako s hlavní komplikací pro možnost nasazení v reálné praxi s požadavkem na použití dvou konvenčních přímých sond, přičemž jedna sloužila pro měření podélné ultrazvukové vlny a druhá pro příčné. Požadavkem vztahu (3.5) je, aby se oba typy vln šířily po stejné dráze, a pokud zanedbáme vliv změny struktury vlivem nevhodného umístění, je třeba zajistit, aby dráhy vln měly stejnou délku. [48]

V případě, že dráhy obou vlnění se neshodují, je nutné rovnici (3.5) doplnit o korekční faktor (inverzní poměr drah obou vlnění). Obecně je u provozované součásti neznámá jak

tloušťka, tak stav vnitřního povrchu. Je tedy možné, že nepřesné umístění obou sond povede k rozdílným drahám, jejichž rozdíl však nebude z mnoha důvodů konstantní a obecně nemá žádný předvídatelný průběh. Požadavek na absolutně přesné pozicování sond by pak vedlo na nepřiměřeně velké časové ztráty, které by zabránily praktickému použití. [48]

Jedním z cílů této práce je proto nalézt možné řešení problému dvou vysílacích sond pomocí techniky Phased Array, která díky svému unikátnímu principu teoreticky umožňuje vybudit jednou sondou oba typy vlnění a vyslat je ze stejného místa stejným směrem, více k této problematice je uvedeno v kapitole 4.

## **4 Ověření schopnosti sond Phased Array detekovat tepelná ovlivnění prostřednictvím sledování trendu poměru rychlostí podélných a příčných ultrazvukových vln**

### **4.1 Technika Phased Array**

I když konvenční ultrazvukové techniky využívající pouze jednoměničové sondy, nebo dvojité sondy s oddělenými měniči, případně dvě separované sondy jsou zatím používány v drtivé většině aplikací v technické praxi, technika Phased array (dále jen „PA“) zaujímá stále větší podíl na poli NDT. [44]

Tato metoda se začala více rozvíjet zejména kvůli požadavkům zkoušení v jaderné energetice, protože bylo nutné např. zlepšit rozlišitelnost při zkoušení heterogenních svarů, možnost detekovat malé trhliny v součástech, jež jsou geometricky složité, zvýšit přesnost určování velikosti vady, možnost detekovat náhodně orientované vady jedinou sondou z jedné pozice atd.

Podstata techniky je interakce mezi vlnoplochami jednotlivých měničů sondy, kdy se vlny navzájem sčítají a odčítají. Fázový posun jednotlivých zdrojů vlnění je způsob, jakým se ovlivňují interakce mezi vlnami, tj. ultrazvukový svazek je možné naklánět, posouvat či „fokusovat“. [44]

Základem techniky je skupinový (array) měnič, složený z více vzájemně oddělených měničů. Ty jsou umístěny v jednom pouzdře a jejich vzájemné spuštění je založeno na umístění jednotlivých elementů na ploše sondy, rychlosti šíření vln, použití předsádky, požadovaný tvar skenu apod. Sonda phased array využívá Huygensův princip<sup>5</sup>. Měniče se spouští v sekvenci, ve které se vlnoplochy jednotlivých elementů sečtou s ostatními a vytvoří tak tvar svazku šířící se materiálem v požadovaném tvaru a směru. Sekvence spuštění se pro různé umístění měničů liší. Na příjmu jsou signály ze všech elementů složeny do jediného, ten poté tvoří část výsledného zobrazení. [44]

Díky výše zmíněné technologii fázování je umožněno tvarování a řízení paprsku a je možné generovat velké množství různých ultrazvukových paprsků z jediné sondy. Sonda

---

<sup>5</sup> Každý bod vlnoplochy, do něhož postupně vlnění izotropního prostředí, v němž existuje vazba, dospělo v určitém okamžiku, můžeme pokládat za zdroj elementárního vlnění, které se z něho šíří v elementárních vlnoplochách. Celková vlnoplocha v dalším časovém okamžiku je vnější obálka všech elementárních vlnoploch a kolmice na ni jednoznačně určuje směr šíření. [44]

může pracovat jako sonda přímá, úhlová, fokusovaná atd. Rozmanitost tvarování svazku je limitována tvarem matice měničů a možnostmi přístroje. [44]

Pro mapování komponent v příslušných úhlech se používá sektorové snímání, což značně zjednodušuje kontrolu součástí. Sektorové snímání se také obvykle používá pro kontrolu svarů. Schopnost kontrolovat svary různými úhly jednou sondou zvyšuje pravděpodobnost detekce vad. Elektronické fokusování umožňuje optimalizovat tvar a velikost paprsku v místě očekávané vady a výrazně zlepšuje poměr signálu k šumu v náročných aplikacích.

Potencionálními nevýhodami systémů PA, jak bylo zmíněno v 2.2, jsou poněkud vyšší náklady a požadavek na vyšší kvalifikaci obsluhy, avšak tyto náklady jsou kompenzovány větší flexibilitou a zkrácením doby provedení dané inspekce. [44]

PA systém je obvykle založen na použití sond s 16 elementy a více (typické je použití 32 elementů a více). Frekvence sond se pohybují v běžném pásmu, které platí i pro konvenční ultrazvuk, tj. 2,5-10 MHz, ale existují i sondy s frekvencí mimo tento rozsah. Na sondy se obvykle připevňují tzv. předsádky (plastové klíny), jež dovolují získat různé tvary svazku. [44]

Technologie PA umožňuje [44]:

- pomocí programování přístroje ovládat náklon sondy, vzdálenost fokusu a velikost ohniska, tyto parametry je možno ovládat dynamicky, a tak efektivněji provádět kontrolu, optimalizovat úhel dopadu svazku atd.,
- kontrolu úhlovou sondou jak ve více pevných úhlech v jednom skenu (např. 45°, 60°, 75°) nebo plynule, v určitém rozsahu úhlů (např. 45-70°),
- provádět sken po délce sondy bez jejího pohybu, pouze přepínáním mezi měniči,
- provádět více typů skenu v jednom kroku kontroly (např. úhlový sken + přímý a sekční sken).

Jak již bylo zmíněno v 3.3, problémem současného postupu měření poměru L/T je použití konvenčních sond, u kterých nastává komplikace v případě požadavku na shodnou dráhu příčných i podélných vln. Tato zásadní nevýhoda u použití sond PA teoreticky odpadá.

Kalibrace přístroje phased array je komplikovanější než u konvenčního ultrazvuku, protože musí být provedena pro každý ultrazvukový svazek generovaný sondou. Při kalibraci je potřeba kompenzovat ztráty útlumem a rozevřením svazku, rozdíly mezi jednotlivými svazky vzniklé různým poměrem energií, které projdou do druhého média vlivem různých

úhlu dopadu na rozhraní, vliv útlumu měřky, který je pro každý svazek jiný (hloubka jednoho reflektoru znamená pro každý svazek různé dráhy). Dále je nutné počítat s tvarem celého skenu a tvarem předsádky, kde vznikají různá zpoždění, a proto se každý ultrazvukový svazek dostane do materiálu v jiném čase od vyslání. [44]

Krom správné kalibrace má vliv na nastavení přístroje také vzájemná vzdálenost sond, tento předpoklad bude ověřen měřením v kapitole 5. Je očekáváno, že vliv předsádky bude minimální. Tím, že je měněna vzdálenost sond, je měněna také velikost neznámého ovlivnění.

Vzhledem k výše uvedenému výsledné hodnoty měření nebudou absolutními daty vzhledem ke špatně sledovatelnému vlivu předsádek. Proto mohou být data zpracovávána pouze jako relativní (srovnávat pouze trend naměřených dat), nebo hodnoty ověřit konvenčním ultrazvukem a tím stanovit absolutní hodnotu pro porovnávání, nebo by vliv zpoždění předsádek musel být nakonfigurován v software, což aktuálně není. Pro experimenty v této práci jsou využity relativní hodnoty.

## 4.2 Experimentální uspořádání

### 4.2.1 Měřicí zařízení

Měření byla prováděna přístrojem Sonatest VEO+ (obrázek 14), na kterém je možné používat obě ultrazvukové techniky – TOFD i Phased Array a to pouhou výměnou příslušného modulu lze velmi jednoduše a rychle změnit techniku UT kontroly bez nutnosti změny celého zařízení. Úplná technická specifikace viz [53].

Přístroj spouští jednotlivé elementy a přijímá z nich signály, také formuje ultrazvukový svazek spuštěním jednotlivých měničů v sekvencích, které jsou předem naprogramovány. Během generování svazku je vyslán spouštěcí puls do generátoru vysokofrekvenčních pulsů s definovaným zpožděním pro každý element, čímž je generován požadovaný tvar svazku. Na příjmu jsou signály digitalizovány a zpoždovány, aby mohly být sečteny jako jediný signál, který je následně zesílen, podle potřeby filtrován, zpracován a uložen.



Obrázek 14 - Přístroj sonatest VEO+ [53]

Při měření byl využit také magnetický manipulátor, který sloužil k udržení sond v požadované vzájemné pozici a konstantní vzdálenosti. Magnetické přichycení zajišťovalo jak vedení, tak přítlak sond a přímou dráhu. Odečet pozic sond zajišťoval enkodér, takže kromě ultrazvukových dat byla sbírána i data o poloze sond. Kalibrace soustavy byla provedena před měřením a v souladu s normou ČSN EN ISO 18563, s vhodnou měrkou dle ČSN EN ISO 2400.

#### 4.2.2 Předsádka

Předsádkami jsou doplněny téměř všechny phased array sondy a využívají se jak pro kontrolu příčnými vlnami, tak podélnými. Slouží k ochraně měniče sondy, efektivnějšímu přestupu vlnění do zkoušeného materiálu a umožňují šíření vlnění materiálem pod žadáním úhlem. Vhodná předsádka také může rozšířit úhlový rozsah.

Předsádky jsou obvykle vyrobeny z nízkoútlumového plexiskla. Úhlové předsádky jsou opatřeny tlumícím tělískem, které pohlcuje část vlny odražené na rozhraní předsádka-materiál a eliminuje tak rušivá echa, která v případě přímého prozvučování nevznikají. Pro měření experimentu byly využity předsádky D1AW-N57S.

#### 4.2.3 Sondy

PA sondy existují v různých provedeních, velikostech, frekvencích i uspořádání měničů. Pro všechny sondy je však společný princip konstrukce, protože každá sonda se skládá z mnoha malých měničů (elementů sondy). Zjednodušeně se skládá sonda z mnoha jednoduchých měničů spojených v jednom pouzdře. Na rozdíl od konvenčních sond jsou PA elementy mnohem menší a jsou spouštěny ve skupinách (tzv. aperturách). Počet měničů může být 16-128 měničů, v rozsahu frekvencí 2,5-10 MHz.

K měření bylo využito sondy T1-PE-5.0M32E0.8P - 5 MHz, 32 měničů, 0,8 mm rozteč měničů. Sondy byly při měření připevněny k ručnímu skeneru, spolu s enkodérem.



Obrázek 15 - Měření pomocí ručního skeneru MagMan

### 4.3 Princip experimentu

K měření byl použit přístroj Sonatest VEO+, sonda: T1-PE-5.0M32E0.8P - 5 MHz, 32 měničů, 0,8 mm rozteč měničů, předsádka: D1AW-N57S a PA-Splitter – IX64 to IX32:32.

Přístroj byl nastaven tak, aby v režimu pitch-catch (průchodová technika) generoval dva různé typy skenů. Aby v materiálu vznikla podélná vlna, bylo k vysílání použito apertury 4 měničů. Použití tak malého počtu měničů zajistí velké rozevření svazku, které vyvolá jak vlnu laterální (pro tento účel nepodstatná), tak vlnu odrážející se od zadní stěny (princip ultrazvukové techniky TOFD). Ultrazvukový svazek je v případě techniky TOFD široce rozevřený a k odrazu do přijímacích měničů dochází vždy po optimální (nejkratší) dráze. Použití principu techniky TOFD mělo za účel nižší citlivost nastavení na změny rychlosti, které by PA nemohla dosáhnout. Díky tomu pro tuto techniku nebylo nutné přesně zadat úhel šíření svazku tak, aby se odrazil přesně do přijímacích měničů. Pro techniku Phased Array je nutné správně (přesně) zadat rychlost šíření ultrazvuku. Tato rychlost se získá kalibrací přístroje na vhodné měrce. V tomto případě ale rychlost nebyla předem známa, ale naopak byla zjišťována, a tak by přístroj nebyl schopný správně nasměrovat ultrazvukový svazek.

V druhém nastavení bylo využito jiné skupiny, opět 4 měničů, tak, aby se v materiálu šířila vlna příčná. Poloha jednotlivých skupin měničů byla volena tak, aby bod výstupu vysílající předsádky a bod vstupu přijímající předsádky byl, pokud možno, stejný pro oba typy vlnění.

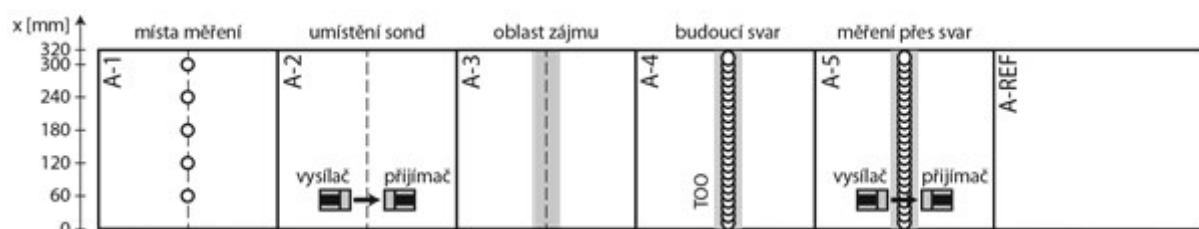
Výstupem byly dva signály, jeden pro podélnou a druhý pro příčnou vlnu, které procházely po stejných drahách. Měřena byla doba průchodu jednotlivých typů vln skrz zkoušenou oblast materiálu. Princip generování jednotlivých typů vln ve zkoušeném materiálu je demonstrováno viz obrázek 16. Měřena byla doba průchodu (TOF) jednotlivých typů vln ( $t_L$ ,  $t_T$ ) s přesností měření na setiny  $\mu s$  (přímým odečtem z přístroje). Tímto způsobem byla ověřována přesnost měření dle zvoleného uspořádání, oproti použití konvenčního ultrazvuku. Výsledný poměr L/T byl získán zpracováním dat v MS Excel, neboť tato funkcionality není v současnosti u software UT Studio+ k dispozici.





Obrázek 16 - Princip měření sondami Phased Array při konstantní vzdálenosti předsádek [48]

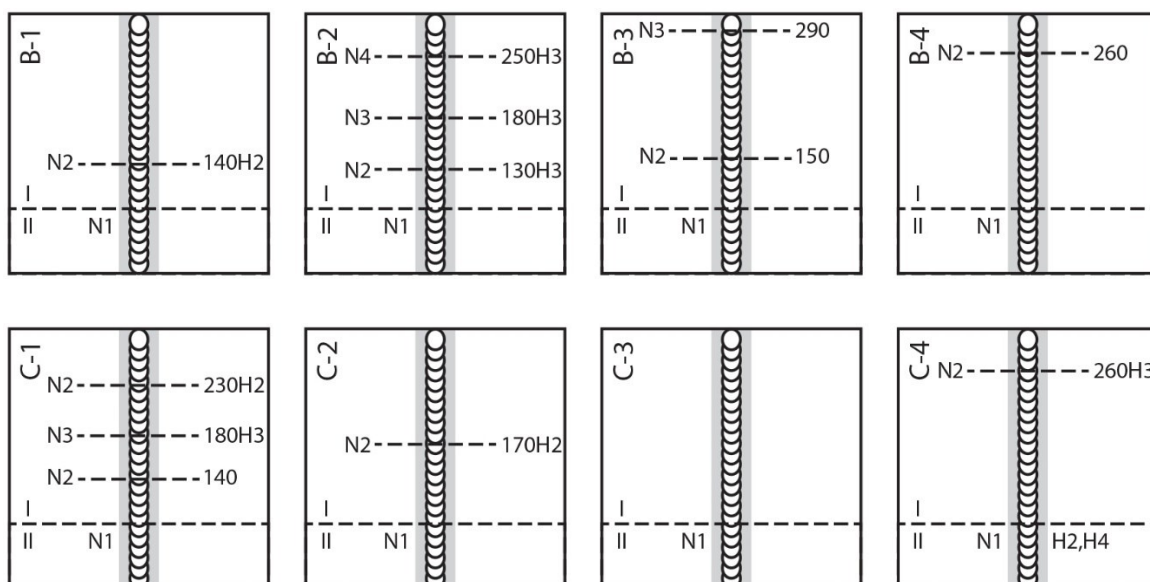
Měření bylo prováděno na vzorcích z 3 typů oceli, a to P265GH, C45+N a 54SiCr6. Tloušťka vzorku  $t_{vz} = 15$  mm. Z každého materiálu bylo vytvořeno pět vzorků o rozměrech 320 x 320 mm. Na každém vzorku bylo provedeno měření podél osy x vzorku a byl zaznamenán trend poměru L/T. V místech, kde bylo provedeno první měření byl posléze udělán řez a vzorky byly v toto místě opětovně spojeny vícevrstevným svařováním metodou MAG na 4 housenky s různými hlavními svařovacími parametry. Tím bylo dosaženo různých tepelně ovlivněných oblastí, a tedy i různé vnitřní struktury a zbytkového napětí pro další měření. Princip tvorby vzorků a měření viz obrázek 17.



Obrázek 17 - Princip měření s vyznačenými místy měření, rozložením sond a návrhem budoucího svarového spoje [48]

Vzorky z materiálu P265GH (skupina A) byly rozděleny na 3 zóny po 80 mm, kde každá zóna byl svařována s jinými hlavními svařovacími parametry. Výchozím stavem byl stav svaření podle kvalifikované WPS (viz příloha 1), přičemž ostatní zóny měly hodnoty proudů a napětí vyšší či nižší než bylo požadováno ve WPS.

Obrázek 18 níže obsahuje nákresy vzorků skupin B (materiál C45+N) a C (materiál 54SiCr6) rozdělených na zóny I a II s úmyslným napojením na rozhraní těchto zón a dalšími napojeními v různých vrstvách svaru, ta simulovala nahodilá napojení svarů při ručním svařování. Ni značí i-té napojení na daném vzorku, přičemž N1 je vždy napojení mezi zónami I a II. Hodnota  $H_i$  označuje napojení i-té housence (počítáno od kořene včetně), pokud  $H$  není uvedeno, napojení bylo v krycí vrstvě.



Obrázek 18- Náskres rozložení napojení ve vzorcích B a C

Cílem takto navrženého experimentu bylo ověřit citlivost poměru LT na různě velké lokální teplotní ovlivnění vyvolané vznikem napojení. Napojení proto byla umístěna do různých housenek, různě daleko od sebe či od okrajů vzorků a na různé materiály.

## 5 Výsledky měření

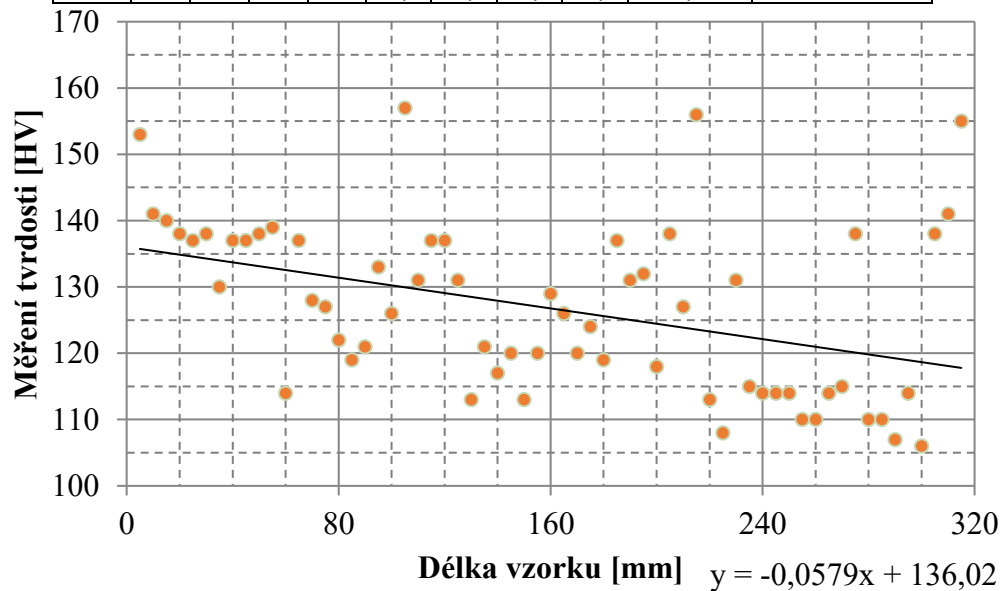
Měření probíhalo technikou poměru rychlostí šíření podélných a příčných ultrazvukových vln (poměr  $L/T$ ) a konvenčním zkoušením Phased Array. Byl porovnáván záznam poměru  $L/T$  s viditelným stavem povrchu krycí housenky a kořene svaru a se záznamem C-scan ze zkoušení konvenčním Phased Array. Na vybraných vzorcích bylo provedeno srovnávací měření tvrdosti ve vzdálenosti 5 mm od zóny částečného natavení. Vzhledem velkému rozptylu hodnot tvrdosti HV10 toto měření nebylo realizováno na všech vzorcích a je názorně zobrazeno jen u jednoho ze zkoušených vzorků.

## Měření tvrdosti

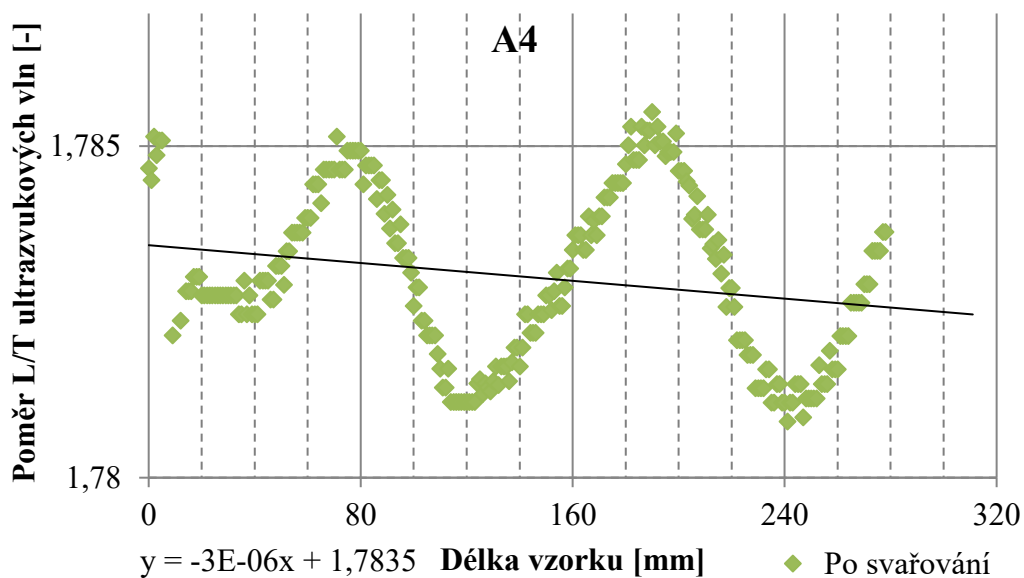
Vzorek A-4, materiál P265-6H, měřeno přenosným tvrdoměrem Mic10

Tabulka 2 - Svařovací parametry vzorku A-4

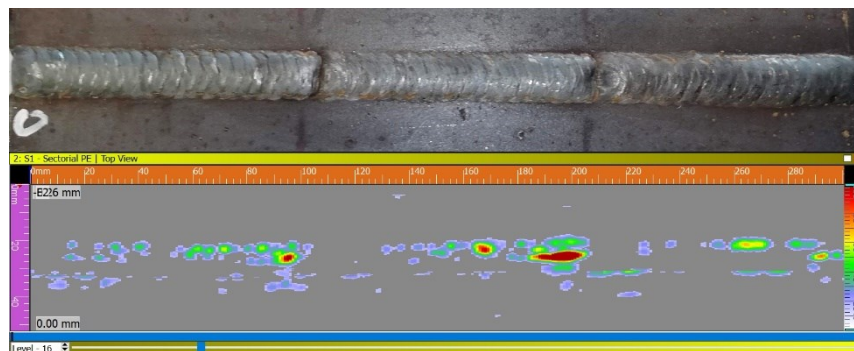
Zóna	I [A]				U [V]				V [mm/s]	Interpass [°C]
I	145	158	164	164	18,9	20,1	20,7	20,7	7,5	50
II	145	142	146	146	18,9	18,6	19	19	6,5	50
III	145	125	131	131	18,9	17,7	17,8	17,8	5,5	50



Graf 1- Měření tvrdosti na vzorku A-4



Graf 2 - hodnoty L/T poměru



Obrázek 19- Fotografie krycí housenky (nahore), záznam indikací pomocí techniky Phased Array na vzorku A-4 (dole)

Pomocí přenosného tvrdoměru byla na vzorku A-4 měřena tvrdost v bodech vzdálených 5 mm od sebe, po celé délce svaru.

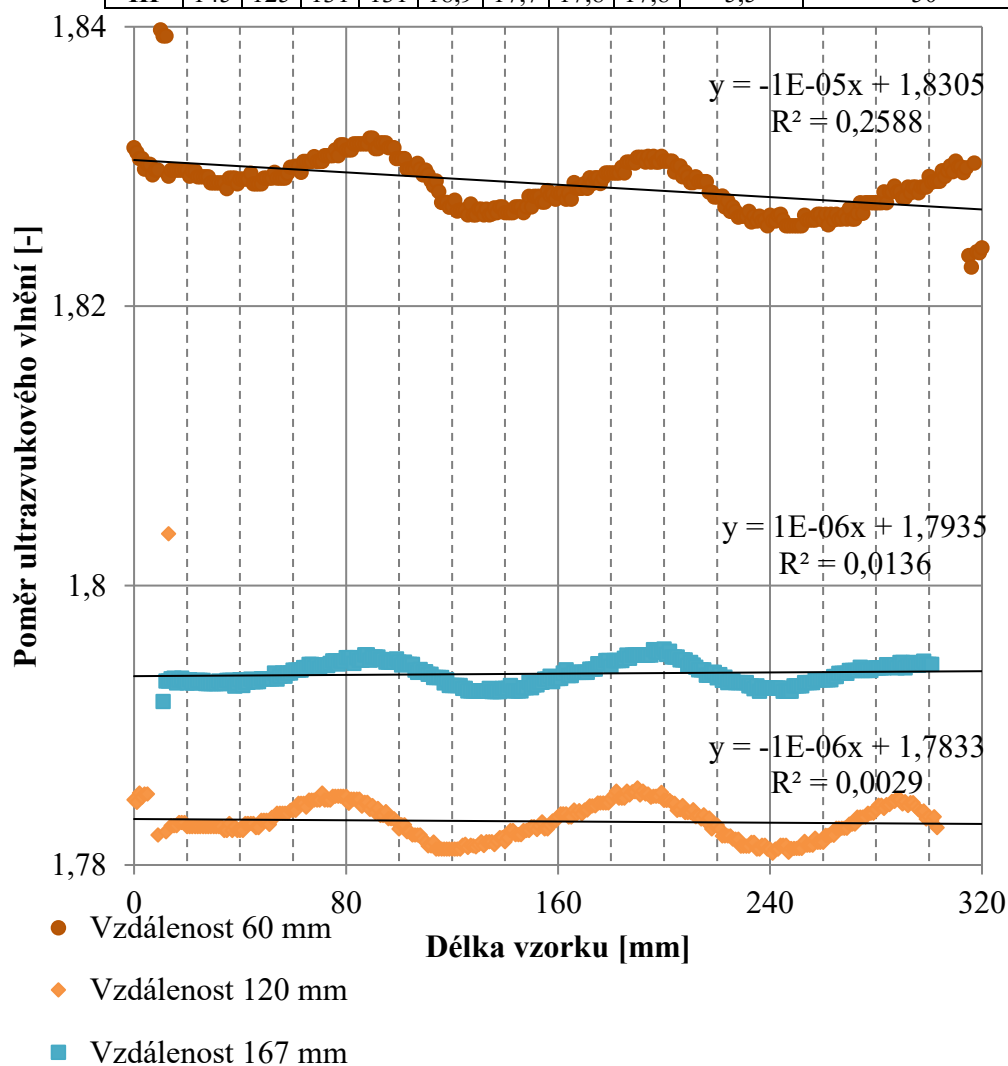
Ke zvýšení tvrdosti na 155 HV došlo na okrajích vzorku a v místě přechodu zón I, II a II, III. Ostatní hodnoty tvrdosti jsou pod hodnotou 143 HV. Patrná je velká nejistota měření hodnot tvrdosti.

## Měření vlivu vzájemné vzdálenosti PA sond

Vzorek A-4, materiál P265-6H

Tabulka 3 - Svařovací parametry vzorku A-4

Zóna	I [A]				U [V]				V [mm/s]	Interpass [°C]
I	145	158	164	164	18,9	20,1	20,7	20,7	7,5	50
II	145	142	146	146	18,9	18,6	19	19	6,5	50
III	145	125	131	131	18,9	17,7	17,8	17,8	5,5	50

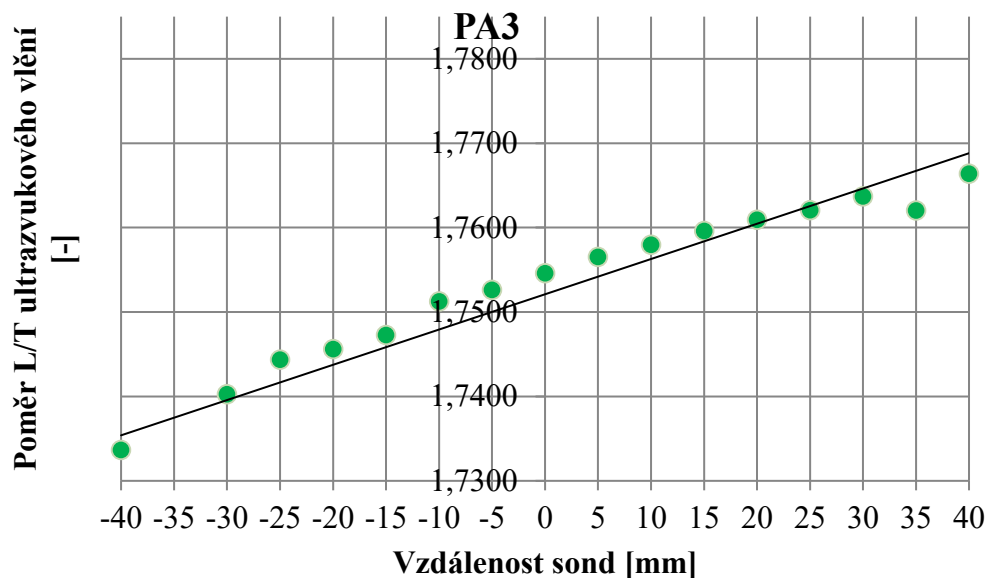


Graf 3- Různá vzájemná vzdálenost sond

Na vzorcích byl měřen vliv vzájemné vzdálenosti mezi čely sond. Vzdálenost mezi sondami byla volena 60, 120 a 167 mm. Průměrná hodnota poměru L/T pro 60 mm byla 1,828, pro 120 mm 1,783 a pro 167 mm 1,793, nastavení bylo průběžně upraveno. S rostoucí vzdáleností sond poměr vykazoval menší výchyly hodnot i menší směrodatnou odchylku vyvolanou větším podílem tepelně neovlivněného materiálu vůči zkoušené oblasti TOO.

## Měření závislosti vzájemné vzdálenosti sond

Vzorek PA3, materiál: neznámý typ oceli



Graf 4 – Závislost poměru L/T na vzájemné vzdálenosti sond

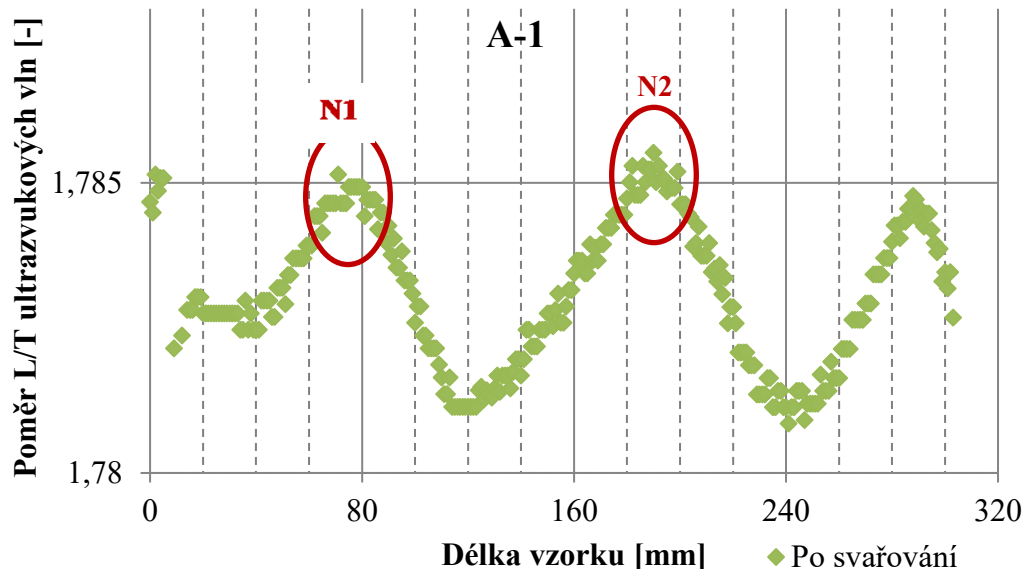
Na vzorku tloušťky 20 mm byl měřen vliv vzájemné vzdálenosti čel PA sond na měřený poměr L/T. Vzdálenost v bodě 0 byla 100 mm. Sonden k sobě byly po 5 mm přibližovány (do vzdálenosti 60 mm) a vzájemně oddalovány (do vzdálenosti 140 mm), nastavení přístroje nebylo během změn vzdáleností měněno. Hodnota poměru L/T se měnila se vzdáleností sond přibližně lineárně ( $R^2 = 0,9034$ ) podle znázorněného trendu. Rozdíl vzdálenosti 10 % (tj. vůči výchozí hodnotě o 10 mm) vyvolal odpovídající změnu poměru o cca 0,08 %.

## Vzorek A-1

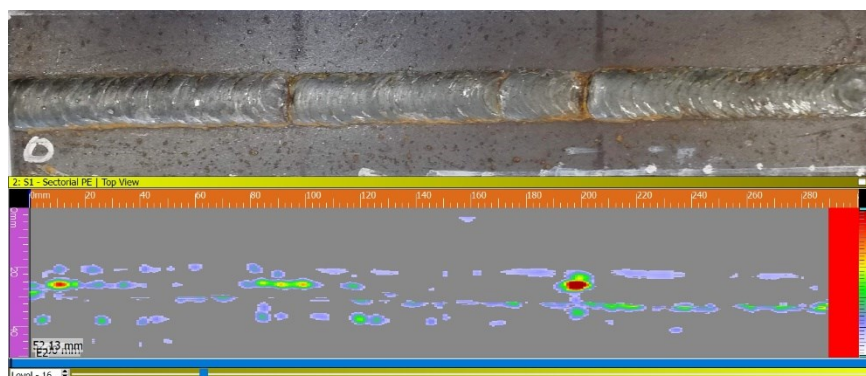
Materiál P265-6H, Svařováno MAG, I dle WPS, II +10 %, III +20%

Tabulka 4 - Svařovací parametry vzorku A-1

Zóna	I [A]				U [V]				V [mm/s]	Interpass [°C]
I	145	158	164	164	18,9	20,1	20,7	20,7	7,5	50
II	145	174	181	181	18,9	21,6	22,2	22,2	8,5	50
III	145	190	197	197	18,9	23,1	23,7	23,7	9,5	50



Graf 5 - Měření poměru L/T A-1



Obrázek 20 - Fotografie krycí housenky (nahore), záznam indikací pomocí techniky PA vzorku A-1

Původní hodnoty poměru L/T se držely při 1,827 a jsou konstantní po celé délce kromě okrajů vzorku, tam měl hodnotu 1,822. Po svaření je viditelné 1 napojení v oblasti přechodu zóny I a II (N1: l=80 mm) a další v oblasti přechodu zóny II a III (N2: l=180 mm). Po změření L/T svařeného vzorku byla naměřena změna v obou oblastech napojení. Hodnoty mezi napojeními dosahují minimální hodnoty 1,782. Hodnoty na okrajích vzorků dosahují až 1,785. Ve svaru se vyskytovaly opakované indikace po celé délce vzorku. Dvě největší indikace se nacházejí přímo v oblasti napojení. Na okrajích jsou zaznamenány lokálně neprovařené kořeny způsobené bodováním vzorků před svařením.

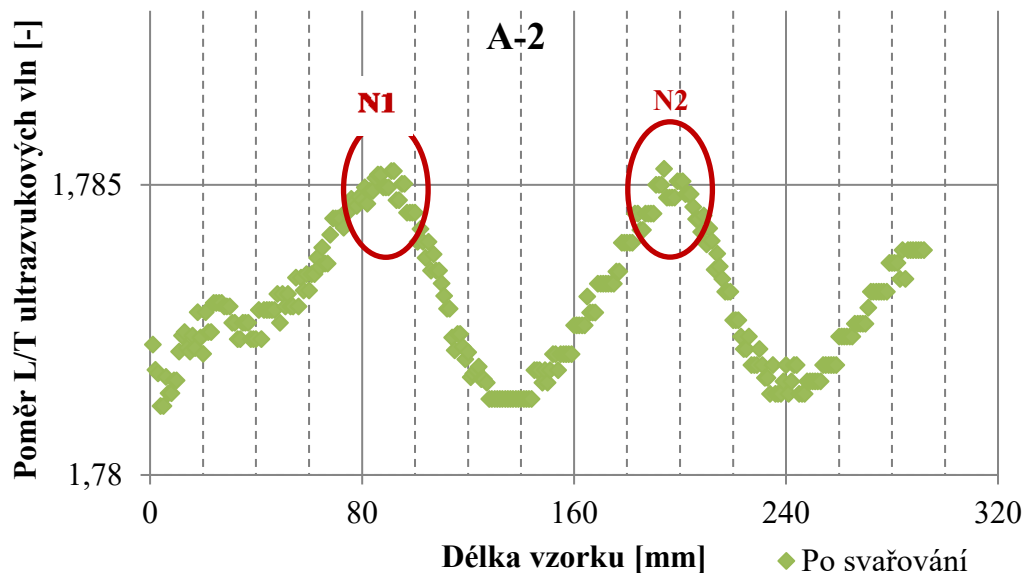


## Vzorek A-2

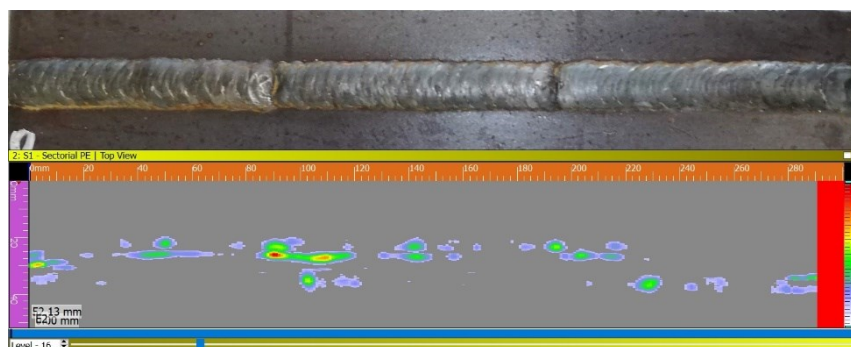
Materiál P265-6H, Svařováno MAG, I -10%, II -20%, III dle WPS

Tabulka 5 - Svařovací parametry vzorku A-2

Zóna	I [A]				U [V]				V [mm/s]	Interpass [°C]
I	145	142	146	146	18,9	18,6	19	19	6,5	50
II	145	125	131	131	18,9	17,7	17,8	17,8	5,5	50
III	145	158	164	164	18,9	20,1	20,7	20,7	7,5	50



Graf 6 - Měření poměru L/T A-2



Obrázek 21- fotografie krycí housenky (nahore) a záznam indikací pomocí techniky Phased Array na vzorku A-2(dole)

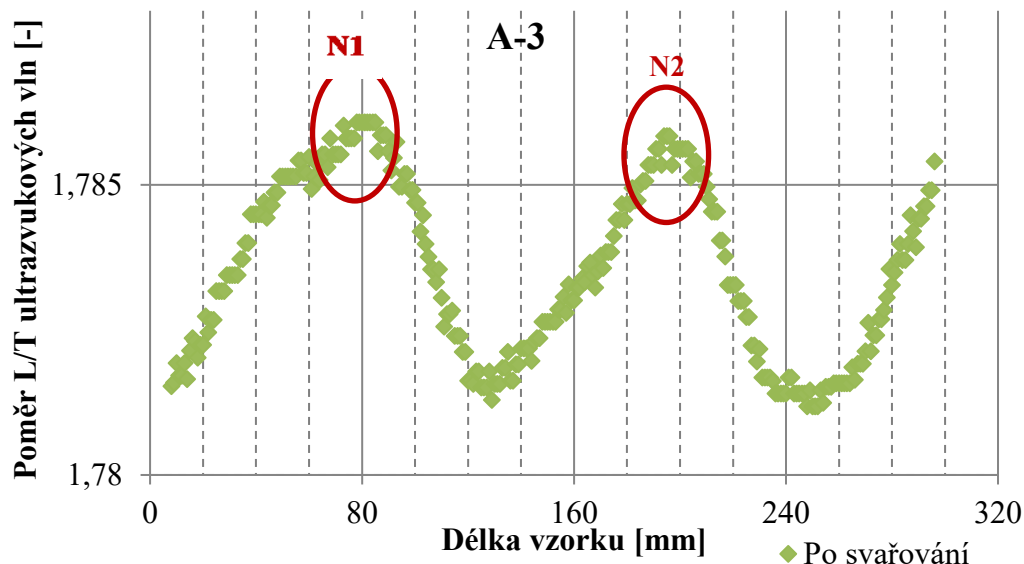
Původní hodnoty poměru L/T se držely při 1,827 a jsou konstantní po celé délce kromě okraje vzorku. Na okrajích mají poměry hodnotu 1,819. Po svaření je viditelné 1 napojení v oblasti přechodu zóny I a II (N1:  $l=80$  mm) a další napojení v oblasti přechodu zóny II a III (N2:  $l=200$  mm). Po změření poměru L/T svařeného vzorku byla naměřena změna v obou oblastech napojení. Hodnoty mezi napojeními dosahují minimální hodnoty 1,782. Hodnoty na okrajích vzorků dosahují hodnot 1,784. Ve svaru se vyskytovaly opakované indikace v oblasti zóny I a II a ojedinělé indikace v oblasti zóny III. Na okrajích jsou zaznamenány lokálně neprovařené kořeny způsobené bodováním vzorků před svařením.

### Vzorek A-3

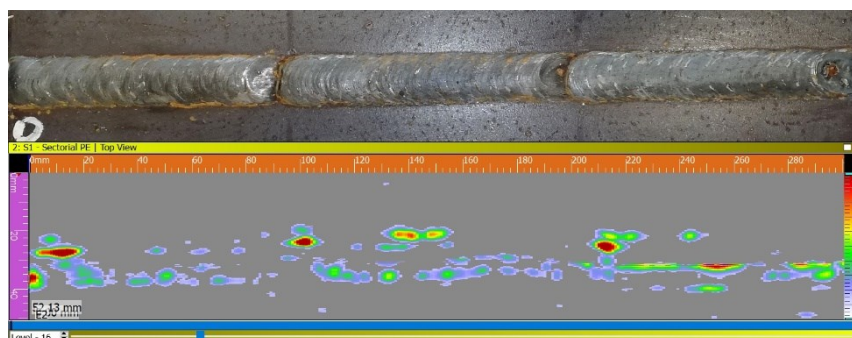
Materiál P265-6H, Svařováno MAG, I dle WPS, +10%, +20%

Tabulka 6- Svařovací parametry vzorku A-3

Zóna	I [A]				U [V]				V [mm/s]	Interpass [°C]
I	145	158	164	164	18,9	20,1	20,7	20,7	7,5	50
II	145	174	181	181	18,9	21,6	22,2	22,2	8,5	50
III	145	190	197	197	18,9	23,1	23,7	23,7	9,5	50



Graf 7 - Měření poměru L/T A-3



Obrázek 22 - fotografie krycí housenky (nahore) a záznam indikací pomocí techniky Phased Array na vzorku A-3 (dole)

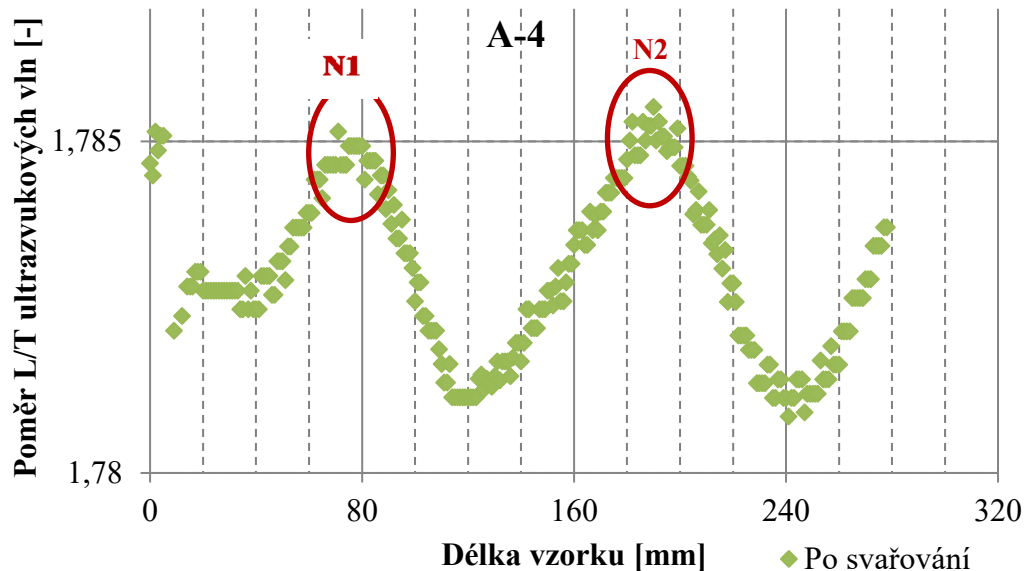
Původní hodnoty poměru L/T se držely při 1,829 a jsou konstantní po celé délce kromě okraje vzorku. Na okrajích mají poměry L/T hodnotu 1,827. Po svaření je viditelné 1 napojení v oblasti přechodu zóny I a II (N1:  $l=80$  mm) a další napojení v oblasti přechodu zóny II a III (N2:  $l=200$  mm). Po změření L/T svařeného vzorku byla naměřena změna v obou oblastech napojení. Hodnoty mezi napojeními dosahují minimální hodnoty 1,782. Hodnoty na okrajích vzorků dosahují hodnot 1,787. Ve svaru se vyskytovaly opakované indikace po celé délce vzorku. Největší indikace se nacházejí přímo v oblasti napojení a v oblasti zóny III. Na okrajích jsou zaznamenány lokálně neprovařené kořeny způsobené bodováním vzorků před svařením.

## Vzorek A-4

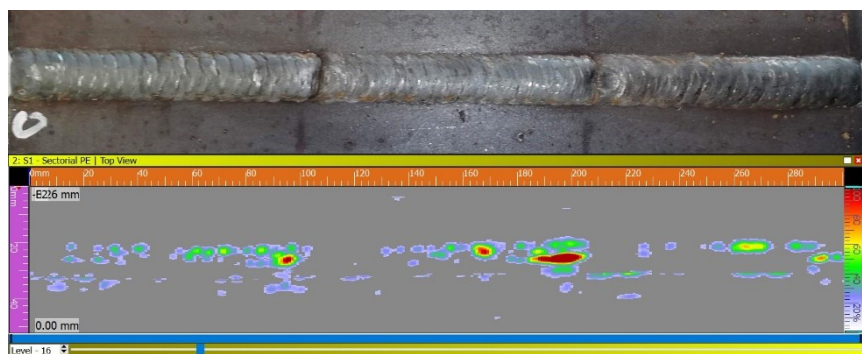
Materiál P265-6H, Svařováno MAG, I dle WPS, II -10 %, III -20 %

Tabulka 7 - Svařovací parametry vzorku A-4

Zóna	I [A]				U [V]				V [mm/s]	Interpass [°C]
I	145	158	164	164	18,9	20,1	20,7	20,7	7,5	50
II	145	142	146	146	18,9	18,6	19	19	6,5	50
III	145	125	131	131	18,9	17,7	17,8	17,8	5,5	50



Graf 8 - Měření poměru L/T A-4



Obrázek 23 - Fotografie krycí housenky (nahore), záznam indikací pomocí techniky Phased Array na vzorku A-4

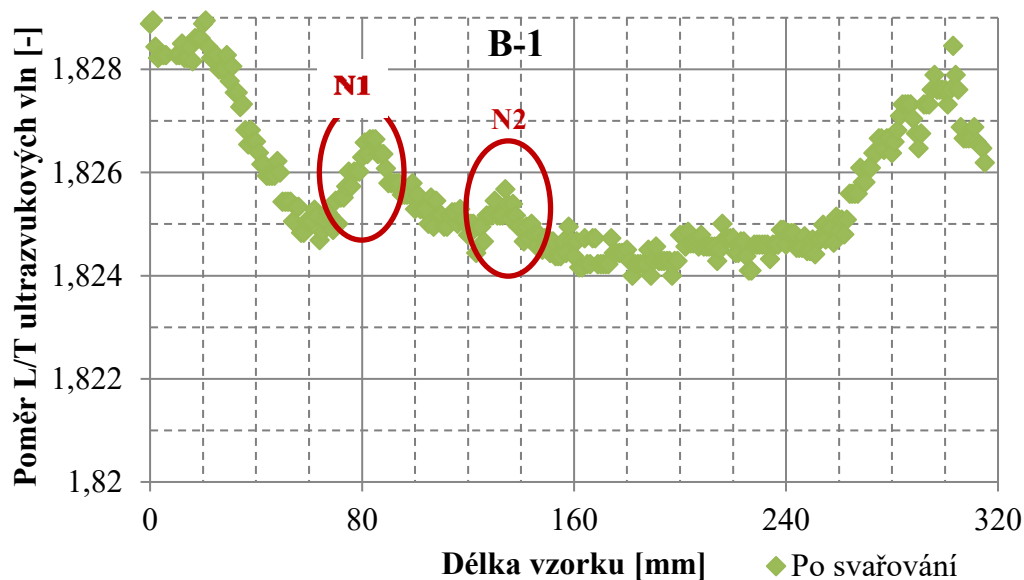
Původní hodnoty poměru L/T se držely při 1,829 a jsou konstantní po celé délce kromě okraje vzorku. Na okrajích mají poměry hodnotu 1,827. Po svaření je viditelné 1 napojení v oblasti přechodu zóny I a II (N1: l=80 mm), další napojení v oblasti přechodu zóny II a III (N2: l=200 mm). Po změření poměru L/T svařeného vzorku byla naměřena změna v obou oblastech napojení. Hodnoty mezi napojeními jsou konstantní s průměrem 1,782. Hodnoty na okrajích vzorků dosahují hodnot 1,787. Ve svaru se vyskytovaly opakované indikace po celé délce vzorku. Největší indikace se nacházejí přímo v oblasti napojení a v oblasti zóny III. Na okrajích jsou zaznamenány lokálně neprovařené kořeny způsobené bodováním vzorků před svařením.

## Vzorek B-1

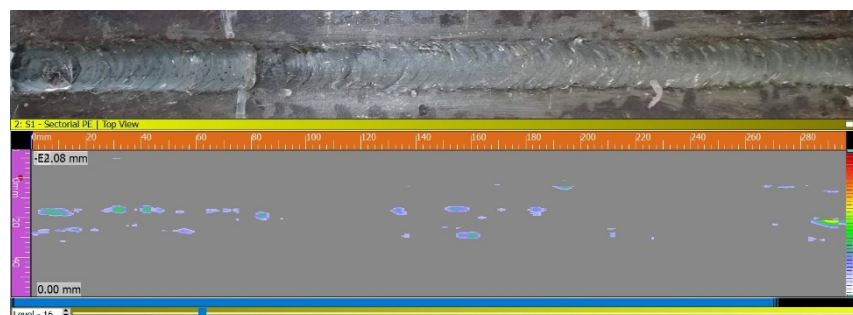
Materiál C45+N, Svařováno MAG, dle WPS

Tabulka 8 - Svařovací parametry vzorku B-1

Zóna	I [A]				U [V]				V [mm/s]	Interpass [°C]
I	145	158	164	164	18,9	20,1	20,7	20,7	7,5	200
II	145	158	164	164	18,9	20,1	20,7	20,7	7,5	200



Graf 9 - Měření poměru L/T B-1



Obrázek 24 - fotografie krycí housenky (nahore) a záznam indikací pomocí techniky Phased Array na vzorku B-1 (dole)

Původní hodnoty poměru L/T se držely při 1,832 a jsou konstantní po celé délce kromě okrajů vzorku. Po svaření je viditelné 1 napojení v oblasti přechodu zóny I a II (N1:  $l=80$  mm). Po změření L/T svařeného vzorku byla naměřena změna v poměru v oblasti napojení N1:  $l=80$  mm i ve vzdálenosti N2:  $l=140$  mm. Hodnoty v oblasti  $l=130-250$  mm konstantní s průměrem 1,8245. Hodnoty na okrajích vzorků dosahují až 1,828

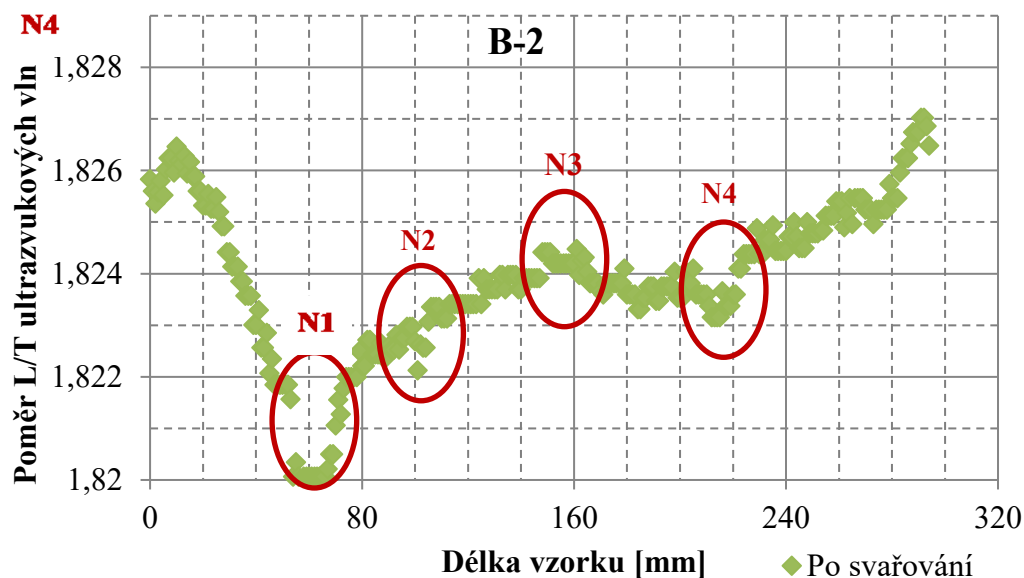
Ve svaru se vyskytovaly opakované indikace v zóně I před napojením N1 ( $l=0-80$  mm) a v oblasti 130-220 mm. Nalezené indikace se nacházely mimo nalezená napojení. Na okrajích jsou zaznamenány lokálně neprovařené kořeny způsobené bodováním vzorků před svařením.

## Vzorek B-2

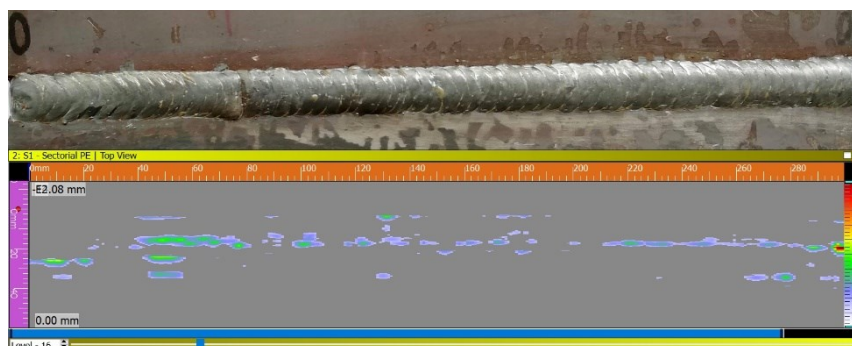
Materiál C45-N, Svařováno MAG, dle WPS

Tabulka 9 - Svařovací parametry B-2

Zóna	I [A]				U [V]				V [mm/s]	Interpass [°C]
I	145	158	164	164	18,9	20,1	20,7	20,7	5,5	200
II	145	158	164	164	18,9	20,1	20,7	20,7	7,5	200



Graf 10 - Měření poměru L/T B-2



Obrázek 25- fotografie krycí housenky (nahore) a záznam indikací pomocí techniky Phased Array na vzorku B-2 (dole)

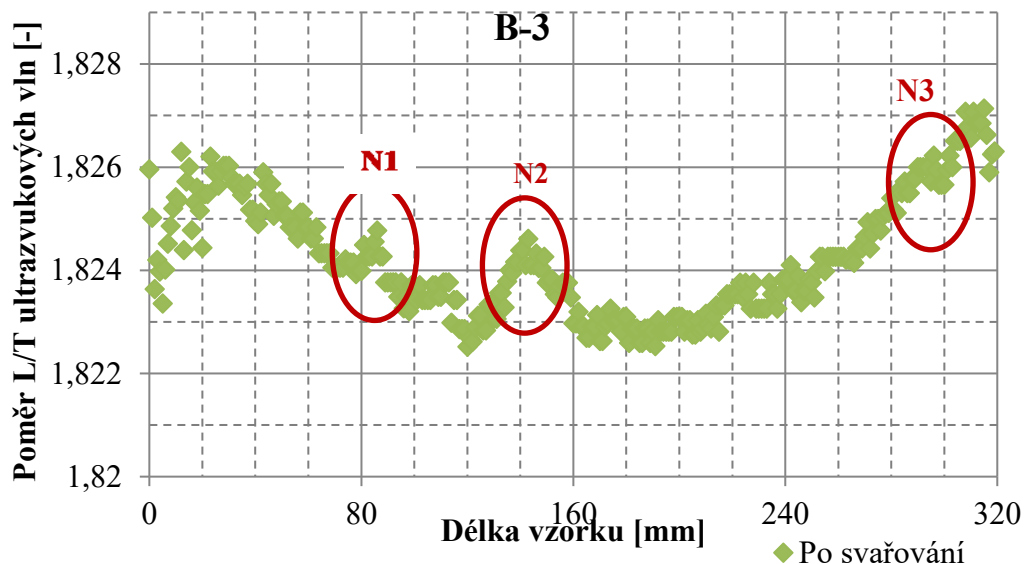
Původní hodnoty poměru L/T se držely při 1,833 a jsou konstantní po celé délce kromě okrajů vzorku. Po svaření je viditelné 1 napojení v oblasti přechodu zóny I a II (N1: l=80 mm). Po změření L/T svařeného vzorku byla naměřena změna v poměru v oblasti napojení N1: l=80 mm, dále ve vzdálenostech 160 mm (N3) a 230 mm (N4). Napojení N2 není v záznamu dobře patrné. Hodnoty v oblasti mezi napojeními nevykazují konstantní hodnotu z důvodu malé vzdálenosti mezi napojeními. Hodnoty na okrajích vzorků dosahují až 1,827. Ve svaru se vyskytovaly opakované indikace po celé délce. Na okrajích jsou dále zaznamenány lokálně neprovařené kořeny způsobené bodováním vzorků před svařením.

## Vzorek B-3

Materiál C45-N, Svařováno MAG, dle WPS

Tabulka 10 - Svařovací parametry

Zóna	I [A]				U [V]				V [mm/s]	Interpass [°C]
I	145	158	164	164	18,9	20,1	20,7	20,7	7,5	200
II	145	158	164	164	18,9	20,1	20,7	20,7	9,5	200



Graf 11 - Měření poměru L-T B-3



Obrázek 26 - Fotografie krycí housenky (nahore) a záznam indikací pomocí techniky Phased Array na vzorku B-3 (dole)

Původní hodnoty poměru L/T se držely při 1,833 a jsou konstantní po celé délce kromě okrajů vzorku. Po svaření je viditelné 1 napojení v oblasti přechodu zóny I a II (N1:  $l=80$  mm) i ve vzdálenostech 140 mm (N2) a 290 mm (N3). Po změření L/T svařeného vzorku byla naměřena změna v poměru v oblasti napojení N1:  $l=80$  mm, dále v oblasti N2:  $l=150$  mm. Napojení N3: 290 mm je téměř neznamenné. Hodnoty mezi oblastmi N2 a N3 ( $l=160-220$  mm) byly konstantní s průměrem 1,823. Hodnoty na okrajích vzorků dosahují až 1,827. Ve svaru se vyskytovaly opakované indikace v oblasti před napojením N1 ( $l=0-80$  mm) a v oblasti 130-220 mm. Na okrajích jsou zaznamenány lokálně neprovařené kořeny způsobené bodováním vzorků před svařením.

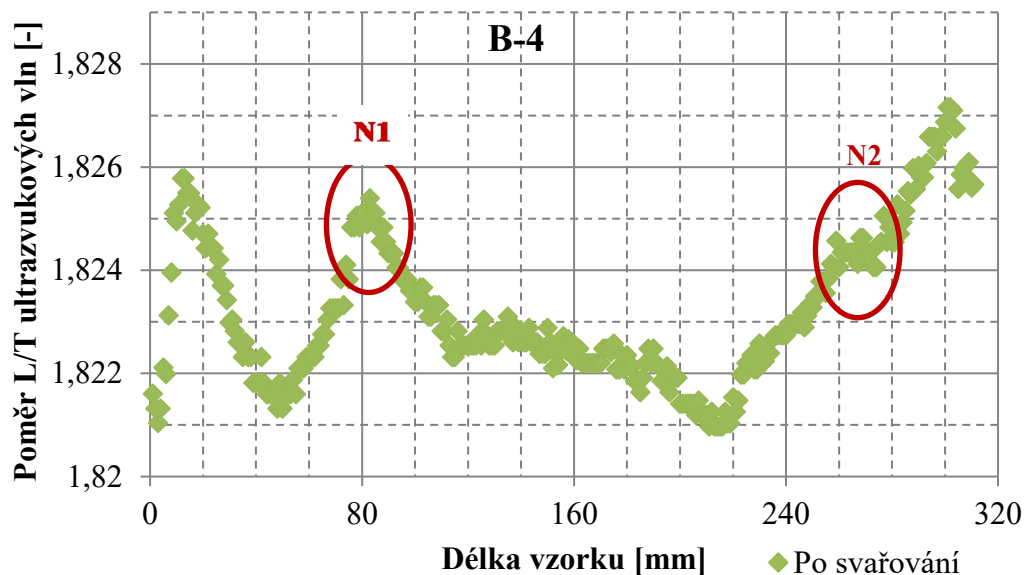


## Vzorek B-4

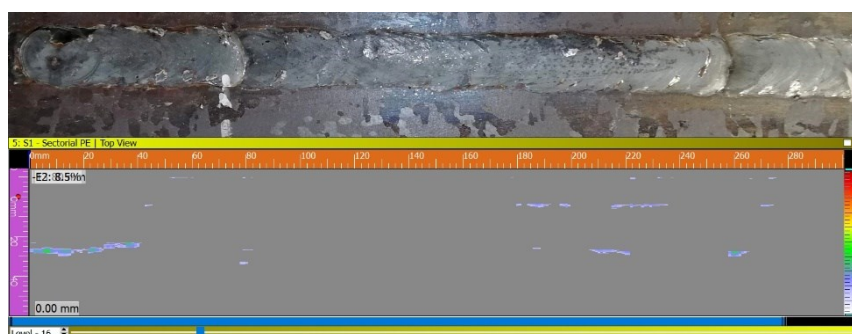
Materiál C45-N, Svařováno MAG, dle WPS

Tabulka 11 - Svařovací parametry

Zóna	I [A]				U [V]				V [mm/s]	Interpass [°C]
I	145	158	164	164	18,9	20,1	20,7	20,7	9,5	200
II	145	158	164	164	18,9	20,1	20,7	20,7	12	200



Graf 12 - Měření poměru L/T B-4



Obrázek 27 - fotografie krycí housenky (nahore) a záznam indikací pomocí techniky Phased Array na vzorku B-4 (dole)

Původní hodnoty poměru L/T se držely při 1,833 a jsou konstantní po celé délce kromě okrajů vzorku. Po svaření je viditelné 1 napojení v oblasti přechodu zóny I a II (N1:  $l=80$  mm) a v oblasti N2:  $l=270$  mm. Po změření L/T svařeného vzorku byla naměřena změna v poměru v oblasti napojení N1:  $l=80$  mm a také v bodě N2:  $l=290$  mm, který je ale v grafu relativně špatně patrný. Hodnoty v oblasti  $l=130-200$  mm konstantní s průměrem 1,8225. Hodnoty na okrajích vzorků dosahují až 1,827.

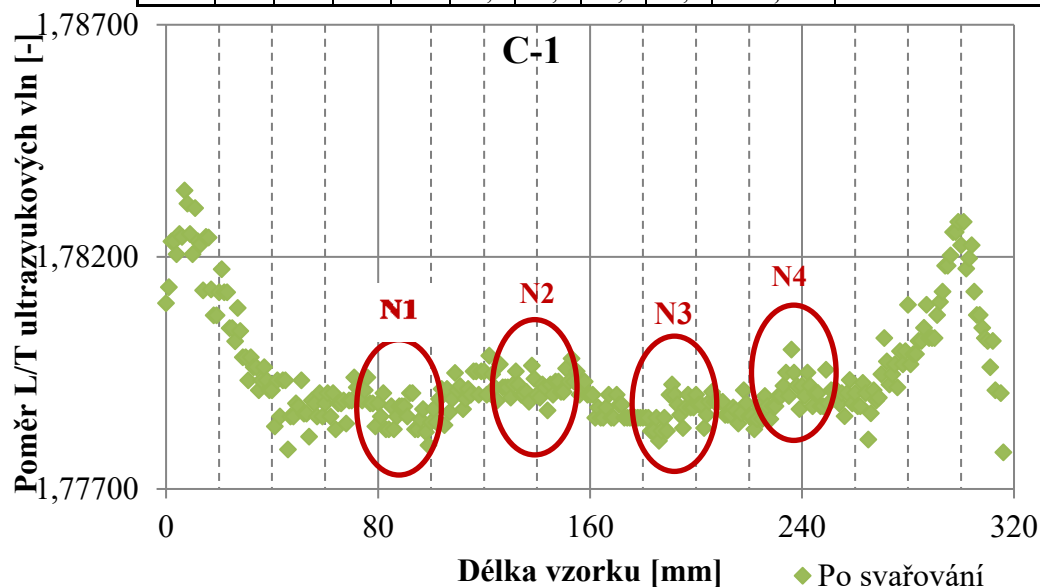
Na okraji jsou zaznamenány lokálně neprovařené kořeny způsobené bodováním vzorků před svařením. Indikace v jiných oblastech jsou pouze ojedinělé.

## Vzorek C-1

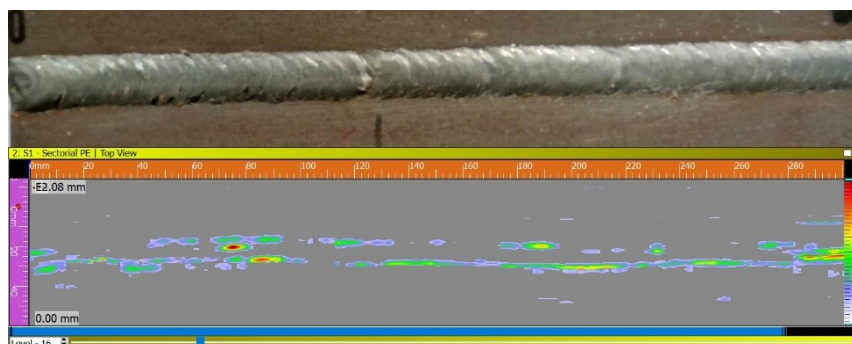
Materiál 54SiCr6, Svařováno MAG, dle WPS

Tabulka 12- Svařovací parametry C-1

Zóna	I [A]				U [V]				V [mm/s]	Interpass [°C]
I	145	158	164	164	18,9	20,1	20,7	20,7	7,5	200
II	145	158	164	164	18,9	20,1	20,7	20,7	7,5	200



Graf 13 - Měření poměru L/T C-1



Obrázek 28 - Fotografie krycí housenky (nahore) a záznam indikací pomocí techniky Phased Array na vzorku C-1

Původní hodnoty poměru L/T se držely při 1,827 a jsou konstantní po celé délce kromě okrajů vzorku. Po svaření je viditelné 1 napojení v oblasti přechodu zóny I a II (N1: l=120 mm). Po změření L/T svařeného vzorku byla naměřena změna v poměru v oblasti napojení N1: l=120 mm, N2: l=140 mm, N3: l=180 mm, N4: l=230 mm. Změny poměru L/T jsou obecně špatně patrné. Hodnoty na okrajích vzorků dosahují až 1,782.

Na okraji jsou zaznamenány lokálně neprovařené kořeny způsobené bodováním vzorků před svařením. Další indikace se nachází po celé délce svaru.

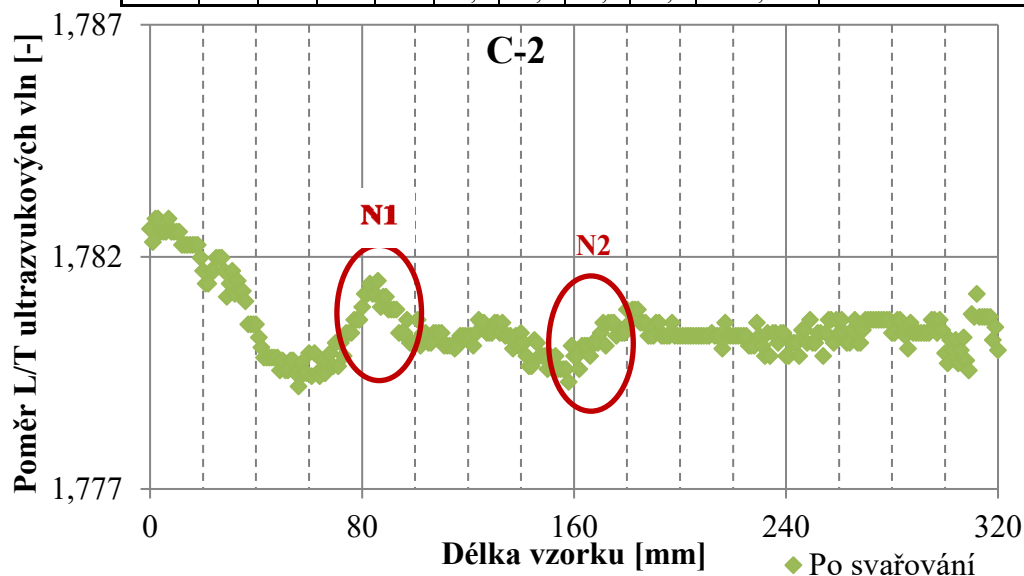


## Vzorek C-2

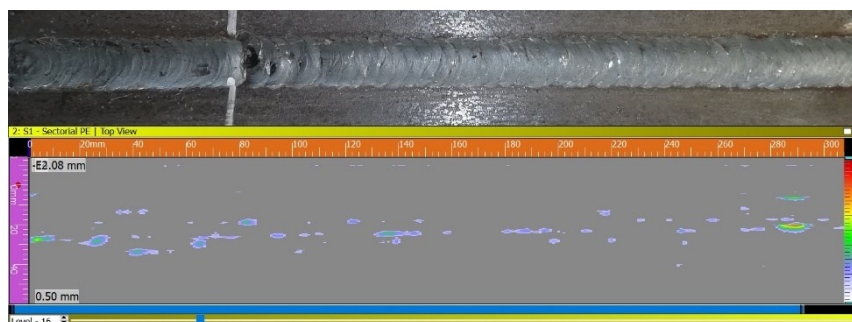
Materiál 54SiCr6, Svařováno MAG, dle WPS

Tabulka 13 - Svařovací parametry

Zóna	I [A]				U [V]				V [mm/s]	Interpass [°C]
I	145	158	164	164	18,9	20,1	20,7	20,7	5,5	200
II	145	158	164	164	18,9	20,1	20,7	20,7	7,5	200



Graf 14 - Měření poměru L/T C-2



Obrázek 29 - Fotografie krycí housenky (nahore) a záznam indikací pomocí techniky Phased Array na vzorku C-2 (dole)

Původní hodnoty poměru L/T se držely při 1,827 a jsou konstantní po celé délce kromě okrajů vzorku. Po svaření je viditelné 1 napojení v oblasti přechodu zóny I a II (N1: l=80 mm). Po změření L/T svařeného vzorku byla naměřena změna v poměru v oblasti napojení N1: l=80 mm, další změna N2: l=170 mm. Hodnoty v oblasti l=180-290 mm konstantní s průměrem 1,780. Hodnoty na okrajích vzorků dosahují až 1,783.

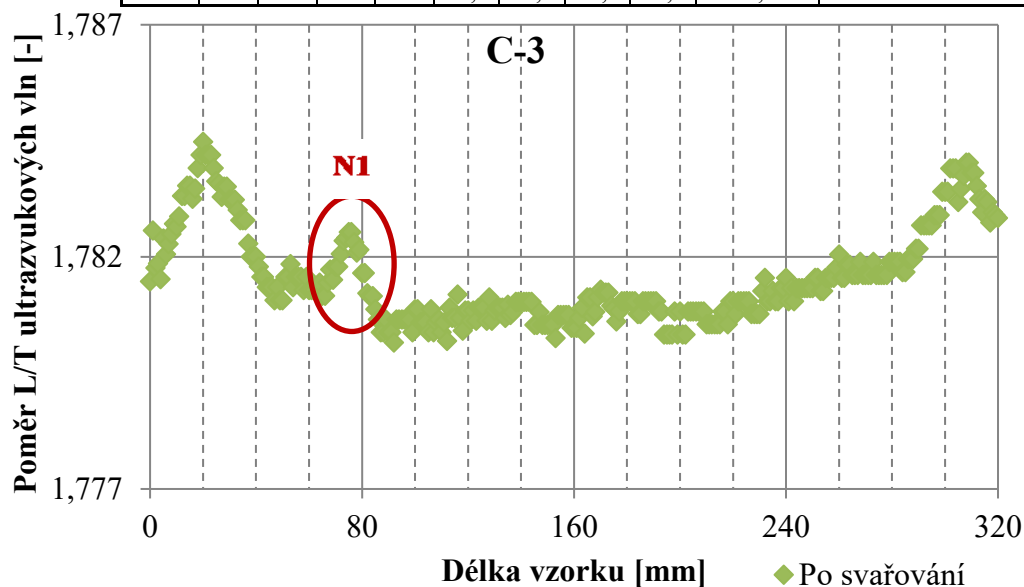
Drobné indikace jsou rovnoměrně rozmístěny podél celé osy svaru. Na okraji jsou zaznamenány lokálně neprovařené kořeny způsobené bodováním vzorků před svařením.

### Vzorek C-3

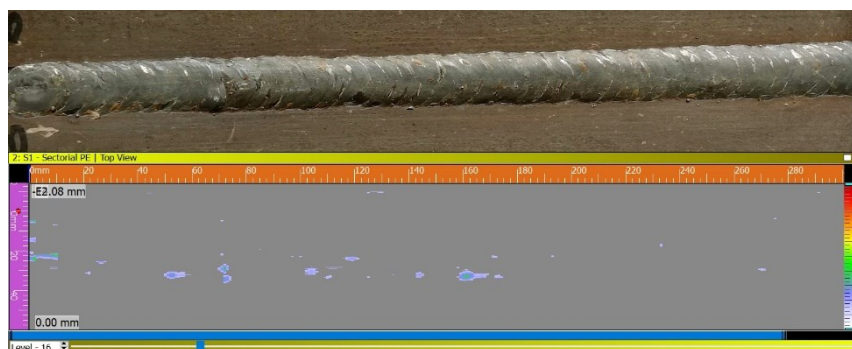
Materiál 54SiCr6, Svařováno MAG, I dle WPS, II +20%

Tabulka 14 - Svařovací parametry

Zóna	I [A]				U [V]				V [mm/s]	Interpass [°C]
I	145	158	164	164	18,9	20,1	20,7	20,7	7,5	200
II	145	190	197	197	18,9	23,1	23,7	23,7	9,5	200



Graf 15 - Měření poměru L/T C-3



Obrázek 30 - Fotografie krycí housenky (nahore) a záznam indikací pomocí techniky Phased Array na vzorku C-3 (dole)

Původní hodnoty poměru L/T se držely při 1,827 a jsou konstantní po celé délce kromě okrajů vzorku. Po svaření je viditelné 1 napojení v oblasti přechodu zóny I a II (N1: l=80 mm). Po změření L/T svařeného vzorku byla naměřena změna v poměru v oblasti napojení N1: l=80 mm. Hodnoty v oblasti l=100-240 mm konstantní s průměrem 1,781. Hodnoty na okrajích vzorků dosahují až 1,785.

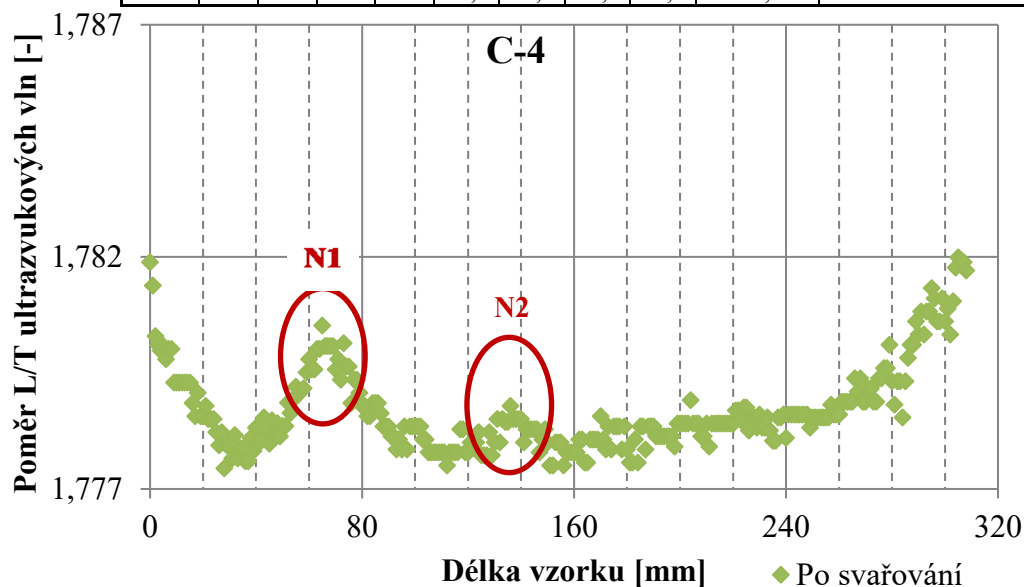
Indikace se vyskytovaly ve vzorku pouze ojediněle. Na okraji jsou zaznamenány lokálně neprovařené kořeny způsobené bodováním vzorků před svařením.

## Vzorek C-4

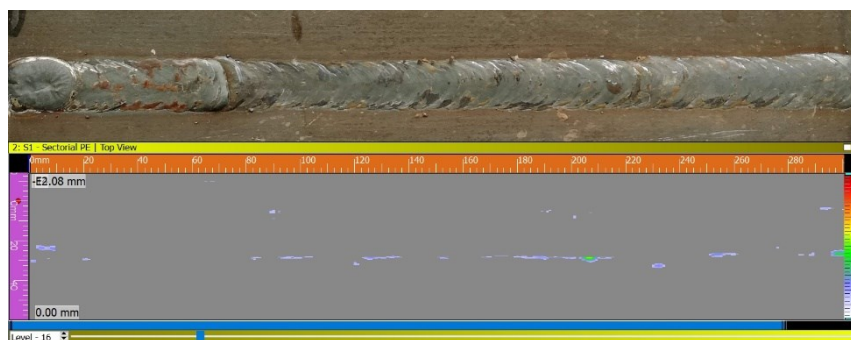
Materiál 54SiCr6, Svařováno MAG, I dle WPS+20 %, II +40 %

Tabulka 15 - Svařovací parametry

Zóna	I [A]				U [V]			V [mm/s]	Interpass [°C]
I	145	190	197	197	18,9	23,1	23,7	9,5	200
II	145	230	230	245	18,9	28,3	28,3	12,5	200



Graf 16 - Měření poměru L/T C-4



Obrázek 31 - Fotografie krycí housenky (nahore) a záznam indikací pomocí techniky Phased Array na vzorku C-4 (dole)

Původní hodnoty poměru L/T se držely při 1,833 a jsou konstantní po celé délce kromě okrajů vzorku. Po svaření je viditelné 1 napojení v oblasti přechodu zóny I a II (N1:  $l=80$  mm). Po změření L/T svařeného vzorku byla naměřena změna v poměru v oblasti napojení N1:  $l=80$  mm. Změna poměru ve vzdálenosti blízko okraje N2:  $l=230$  mm není znatelná. Naopak byl pozorována odchylka poměru L/T v oblasti  $l=140$  mm. Hodnoty v oblasti  $l=130-220$  mm konstantní s průměrem 1,823. Hodnoty na okrajích vzorků dosahují až 1,827.

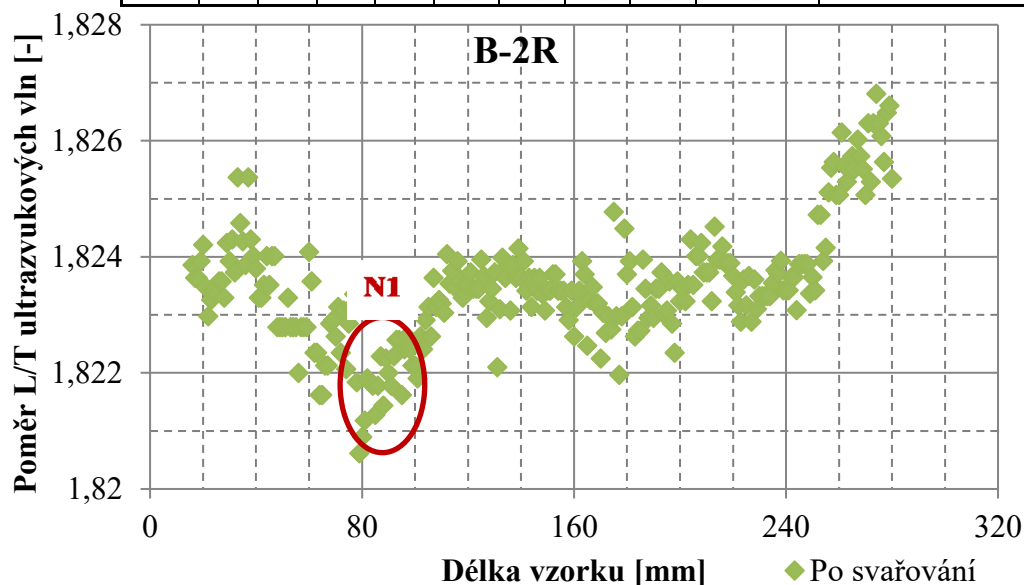
V materiálu se vyskytují lineární indikace po celé délce svaru. Oblast výchylny poměru L/T v oblasti N3 neobsahuje žádné indikace. Na okraji jsou zaznamenány lokálně neprovařené kořeny způsobené bodováním vzorků před svařením.

## Vzorek B-2R

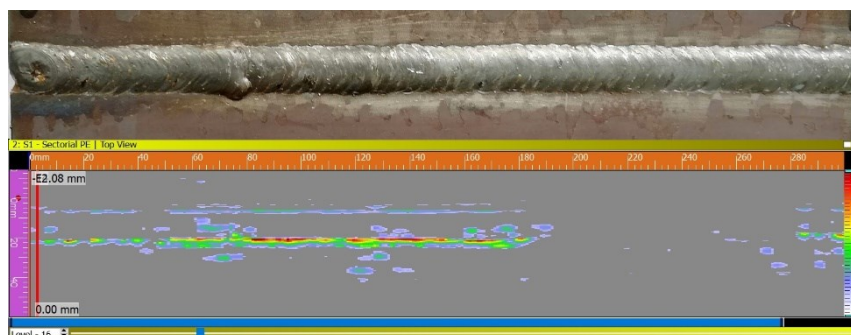
Materiál 54SiCr6, Svařováno MAG, dle WPS

Tabulka 16 - Svařovací parametry B-2R

Zóna	I [A]				U [V]				V [mm/s]	Interpass [°C]
I	145	158	164	164	18,9	20,1	20,7	20,7	5,5	200
II	145	158	164	164	18,9	20,1	20,7	20,7	7,5	200



Graf 17 - Měření poměru L/T B-2R



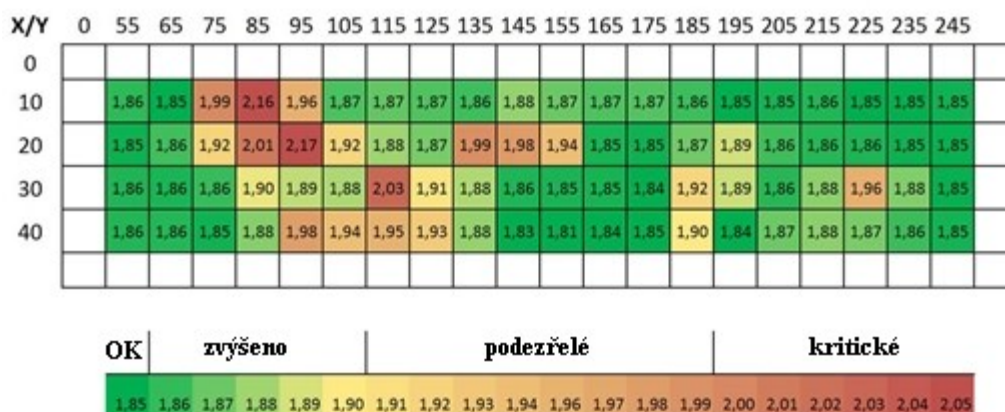
Obrázek 32 -fotografie krycí housenky (nahore) a záznam indikací pomocí techniky Phased Array na vzorku B-2R(dole)

Původní hodnoty poměru L/T se držely při 1,833 a jsou konstantní po celé délce kromě okrajů vzorku. Po svaření je viditelné 1 napojení v oblasti přechodu zóny I a II (N1: l=80 mm). Po změření L/T svařeného vzorku byla naměřena změna v poměru v oblasti napojení N1: l=80 mm. Hodnoty v oblasti l=130-220 mm konstantní s průměrem 1,8235. Hodnoty na okrajích vzorků dosahují až 1,827. Tento vzorek vykazuje zvýšenou směrodatnou odchylku měřených dat po celé své délce.

Ve vzdálenosti 0-200 mm byl na zadní straně vzorku vizuálně pozorovatelný neprovařený kořen, který je opět patrný na pravém okraji blízko l=320 mm.

## Vzorek parovodu EPC 17-21-1C

### C-sken poměru rychlostí podélných a příčných vln (L/T poměr)



Obrázek 33 - C-Sken parovodu



Obrázek 34 - Fotografie parovodu

Zkoušený vzorek (viz obrázek 34) parovodu byl zapůjčen od společnosti UJP Praha a.s. Vzorek byl odebrán z provozovaného zařízení z důvodu výskytu creepových trhlin na povrchu v místě ohybu parovodu. Vzorek byl kontrolován soustavou dvou phased array sond stejným způsobem jako předchozí vzorky, avšak vzájemná vzdálenost sond byla dána na minimum, tj. čela sond se dotýkaly. Vzorek byl kontrolován s použitím dvousosého enkodéru umožňující záznam poměru L/T pro jednotlivé pozice formou zobrazení C (viz obrázek 33). Velikost jednoho pole je 10x10 mm. Vzhledem ke geometrii vzorku a sond nebylo možné prozkoumat okraje vzorku. Navržená barevná škála indikuje odchylku měřených hodnot od běžné hodnoty, která se pro dlouhodobě provozovaná zařízení z oceli 15128 pohybuje 1,84. Navržené rozdělení hodnot v uvedené škále je přibližné. Z měřených dat je patrné, že vzorek vykazuje na většině měřených polí standardní hodnoty poměru L/T v rozsahu 1,85-1,86. Na vzorku se vyskytují 2 oblasti zvýšených hodnot, přičemž v jedné oblasti se vyskytují hodnoty přesahující stav, který podle výzkumu Zavadila [52] byl interpretován jako kritický.

## 6 Diskuze

Ověření aplikovatelnosti PA sond pro měření L/T poměru potvrdilo původní očekávání, dle [48], že použité sondy byly schopny dosáhnout nízké úrovně nejistoty ve srovnání s použitím páru přímých konvenčních ultrazvukových sond. Tento poměr je využíván pro strukturní analýzu materiálů vystavených dlouhodobému zatěžování za vysokých teplot a tlaků, především pro detekci tečení, jež patří mezi hlavní vysokoteplotní degradační mechanismy v energetickém a petrochemickém průmyslu. Úkolem práce bylo navržení způsobu, jak generovat oba typy ultrazvukových vln, tj. podélných i příčných a vyslat je po stejné dráze, tj. především pod stejným úhlem. Možné aplikace uvažovaly zkoušení přímými sondami a úhlovými (např. pro kontrolování svarových spojů).

### 6.1 Nejistota měření absolutních hodnot poměru L/T

Přístroj nastavený v režimu pitch-catch generoval dva různé typy skenů tak, aby v materiálu vznikla podélná i příčná vlna. K vysílání bylo použito apertury 4 měničů pro každou z vln, buzené apertury měničů byly střídány s vysokou opakovací frekvencí. Sondy byly nastaveny tak, aby bod výstupu z předsádky vysílací sondy byl, pokud možno stejný pro oba typy vlnění, vyslaný pod stejným úhlem. Toho se docílovalo kombinací volby vhodné skupiny měničů a jejich vhodným buzením (sondy byly buzeny s vzájemným zpožděním). Výstupem poté byly dva signály procházející po stejných drahách. Při experimentu bylo použito sondy s 32 měniči T1-PE-5.0M32E0.8P - 5 MHz, během přípravy a nastavení zařízení experimentu bylo pozorováno, že volba měničů má zásadní vliv na nominální hodnotu poměru L/T. Změna vybrané skupiny 4 měničů o jednu pozici pro úhel  $60^\circ$  ve zkoušeném materiálu vedla ke změně poměru L/T (při fixním nastavení úhlu šíření vlnění) až o 0.07 (tj. o 4 %). Dále bylo zjištěno, že s klesajícím požadovaným úhlem šíření vln se tato nejistota zvyšuje. Vzhledem k tomu, že doba průchodu skrze daný materiál se nastavením přístroje nemění (tj. je poplatná pouze zvolené dráze a vlastnostem zkoušeného materiálu), lze usoudit, že změna poměru je vyvolána drobnými změnami dráhy v důsledku diskrétního posunu budicí soustavy měničů, a tím i bodu výstupu z předsádky. Tyto rozdíly jsou diskrétního rázu, a tudíž nelze poměr L/T zcela optimalizovat na správnou (absolutní) hodnotu měřenou konvenčním způsobem. Vyšší počet měničů však povede ke zjemnění diskrétního kroku a tím zmenšení nejistoty. Pro další diskusi výsledků je nutné uvažovat, že všechny hodnoty v grafech graf 5-graf 17 jsou hodnoty relativní, nikoliv absolutní, a předmětem zájmu je sledování změny trendu těchto hodnot, nikoliv jejich absolutní výše.

## 6.2 Vliv vzdálenosti sond

Aby mohlo podélné i příčné vlnění procházet po stejné dráze, musel být zajištěn stejný bod výstupu, stejný směr šíření, úhel šíření i dráha šíření obou ultrazvukových vln. Důvodem je, aby obě vlnění procházela stejnou (a tudíž stejně ovlivněnou) strukturou. Rozdíl v efektivní dráze (tj. dráze ve zkoušeném materiálu) je přípustný za předpokladu, že je velmi malý a za každých okolností konstantní. V takovém případě rozdíl drah vede pouze ke změně relativní hodnoty poměru  $L/T$ , aniž by změnil sledovaný trend.

Celková dráha (tj. efektivní dráha v materiálu a dráha v obou předsádkách) vln od jedné sondy (vysílací) k druhé (přijímací) se však může měnit, jak je vidět viz obrázek 16. V důsledku změn vzdálenosti sond (např. manuálním vedením sond) dochází ke změnám drah v předsádce přijímací sondy a tím k adekvátní změně  $L/T$  poměru. Neboť v praxi nelze efektivně měřit a průběžně zohledňovat aktuální vzdálenost sond, vede systém dvou sond s proměnnou vzájemnou vzdáleností k nahodilým a nepředvídatelným změnám dráhy ultrazvukových vln, a tedy i poměru  $L/T$ . To může vést k mylné interpretaci naměřených výsledků. To potvrzuje provedené měření na vzorku PA3, kde výchozí vzdálenost mezi sondami byla 100 mm a ta byla postupně zvyšována/snižována o 5 mm v intervalu 60-140 mm. Na graf 4 je zřetelné, že pokud se vzdálenost sond změní o 10 % dojde ke změně  $L/T$  poměru o 0,0816 %. Takto velká změna převyšuje směrodatnou odchylku pro trend poměru  $L/T$  v oblastech jejich konstantních hodnot a mohlo by tak proto při manuálním vedení sond dojít k mylným interpretacím výsledků. Toto chování má lineární charakter, tj. výchylky se lineárně zvětšuje se vzdáleností sond). Z toho lze usoudit, že použití systému měřicího relativní hodnoty poměru  $L/T$  (tj. ne absolutní, ale poplatné volbě měničů sondy, vzdálenosti apod.) vyžaduje použití manipulátoru či scanneru, v kterém budou obě sondy pevně upnuty v definované vzájemné vzdálenosti a orientaci. Naopak bylo zjištěno, že nejistota měření poměru  $L/T$  s použitím manipulátoru je o 1 řád lepší než u konvenčních sond viz srovnání s výsledky Zavadila v [1].

## 6.3 Detekce změn svařovacích parametrů

Hlavním uvažovaným uplatněním navrhované metodiky je detekce tečení v provozu. Z důvodu omezené dostupnosti vzorků zatížených tečením v primárním a sekundárním stádiu (tj. nezkolabovaných) byly pro simulaci vlivu tepelných ovlivnění použity svary na ocelích příbuzných zušlechťeným žárovevným uhlíkovým ocelím. Vzorky svarů byly voleny z důvodu jednoduché měřitelnosti parametrů procesu a známého očekávaného chování vzorků.



Experiment byl prováděn a 3 různých materiálech a to P265GH (skupina A), C45+N (skupina B) a 54SiCr6 (skupina C). U materiálu P265GH (sada vzorků ozn. A) bylo účelem měření prokázat, že změna svařovacích parametrů vedoucí ke změně struktury má měřitelný vliv na poměr  $L/T$  a současně ověřit, zda lze sledováním poměru  $L/T$  zjišťovat odchylky od změn svařovacích parametrů. Výchozí stav byl volen podle kvalifikované WPS. Na jednotlivých zónách vzorků poté byly voleny zvýšené a snížené hodnoty svařovacích parametrů ( $\pm 10\%$  I,  $\pm 20\%$  I a ekvivalentní změna U). Během experimentu bylo zjištěno, že změna svařovacích parametrů vede ke změnám poměru  $L/T$  (viz klesající trend graf 5-graf 8). Tyto změny jsou však velmi malé a jsou do značné míry zakryty vlivy napojení svarových housenek, které zjevně lokálně vyvolaly výrazně větší změny vlastností než pouhá změna množství vneseného tepla pomocí přenastavení parametrů svařovacího stroje. V důsledku vlivu napojení svarových housenek nebylo možné spolehlivě určit absolutní rozdíl poměrů  $L/T$  pro jednotlivé svařovací parametry.

Analýzou sad vzorků B a C a především pak částí bez napojení svarových housenek bylo zjištěno, že změna svařovacích parametrů skutečně způsobuje měřitelnou změnu v  $L/T$ . Tato změna je však velmi malá a pohybuje se na hranici měřitelnosti ( $\Delta L/T$  poměru je max 0,002), přitom je způsobena relativně velkými změnami parametrů svařování, které by v praxi neměly běžně nastat.

Tato odchylka je o 3 řády nižší než odchylky v trendu  $L/T$  měřené při detekci tečení, jak ukazuje Zavadil ve své práci [1] (degradovaný materiál vykazoval změny v řádech jednotek procent, až do maximální výše cca 12 % od výchozí hodnoty 1,84). Pro efektivnější prokázání využitelnosti  $L/T$  pro detekci změny svařovacích parametrů by bylo zapotřebí velké množství různých vzorků, které pro tento experiment nebyly k dispozici. Toto téma bude předmětem případného dalšího výzkumu.

#### **6.4 Detekce lokálních strukturních změn**

U plechů C45+N a 54SiCr6 byly vzorky vyrobeny stejným způsobem, avšak s menším množstvím napojení tak, aby vliv změny poměru  $L/T$  v důsledku napojení byl lépe sledovatelný. Byl proveden návrh svaru tak, aby bylo možno ověřit, zda je možné detekovat:

1. Jak velké ovlivnění je možné zaznamenat (umístění některých napojení blízko sebe či přímo nad sebe do jednotlivých housenek)
2. Zda je možné tyto změny detekovat po celé délce vzorku nebo zda existuje okrajový efekt, který data znehodnotí (umístění napojení blízko okrajů)



3. Zda existuje hloubka pod povrchem, kde ovlivnění formou napojení nelze detekovat (umístění napojení do různých housenek – počítáno od kořene = H1).

Bylo zjištěno, že existuje výrazný okrajový efekt, způsobený nutností vystavení místa počátku svařování působení elektrického oblouku po delší dobu než při kontinuálním svařování, což vede k lokálnímu navýšení vneseného tepla. Takové místo se metalurgicky chovalo stejně jako samotné napojení, a proto některá napojení, vyskytující se blízko okrajů vzorků, byla těžko detekovatelná (viz graf 10, graf 12). I přesto však při podrobné analýze bylo možno projevy vlivu napojení na trend poměru  $L/T$  zaznamenat, viz graf 10, napojení N2. Okrajový efekt většinou přesahoval svou nominální změnou poměru  $L/T$  jakékoliv jiné vlivy sledované na vzorcích.

Vliv hloubky (tj. housenky, na které bylo provedeno napojení) na  $L/T$  nebyl pozorován. Při podrobném prozkoumání vzorku C1 byly patrné změny poměru  $L/T$  ze všech napojení svarových housenek a jejich rozdíl se neměnil s hloubkou pod povrchem. Změny  $L/T$  však byly velmi malé, což částečně způsobil i zvolený materiál vysoké tvrdosti (HV~254).

Na vzorku B-2 bylo prokázáno, že několik napojení umístěných ve vzájemné blízkosti může zahladit či zdeformovat záznam trendu  $L/T$ .

Z provedených měření bylo vypořádováno, že trend  $L/T$  má výraznější změnu poměru  $L/T$  pro materiály s menší nominální tvrdostí (tj. nejvíce patrný je pro P265GH (sada A), nejméně pro 54SiCr6 (sada C)). Proto plechy A vykazují v grafech spíše tvaru vlnění, oproti tomu plechy C mají snadno rozlišitelné a lokalizovatelné píky.

## **6.5 Vliv vad na schopnost detekce a na nejistotu měření**

Z provedených ultrazvukových měření bylo zjištěno, že přítomnost nahodilých vad ve svaru nemá měřitelný vliv na trend poměru  $L/T$ . Přítomnost systematických vad, jako je neprovařený kořen na vzorku B2R, však vedla k výraznému zvýšení směrodatné odchylky. Předpokládaným důvodem jsou změny délky dráhy při pohybu sondy ve směru osy svaru. To mohlo mít za následek skrytí „malých“ odchylek (vytvořených např. 1 napojení). Velké odchylky (např. vyvolané více napojeními v jednom místě, viz rozhraní zóny I a II viz graf 11) jsou i přes tyto vady stále znatelné. Pro změny vyvolané procesy, jako je např. tečení, je vliv přítomnosti podobných defektů zanedbatelný, neboť změny  $L/T$  jsou v takovém případě řádově vyšší. Tento jev však může být příčinou větších směrodatných odchylek při měření na materiálech ovlivněných tečením v terciálním stádiu, jak bylo vidět v [52] (při terciálním

tečení se ve struktuře vyskytují mikrotrhliny a kavity a koroze či opotřebení u takto degradovaných materiálů často vede k prudkým změnám drsnosti povrchu).

## **6.6 Použití sond Phased Array pro provozované součásti**

Další měření bylo provedeno na části parovodu, pomocí úhlových PA sond, viz obrázek 33. Toto měření bylo provedeno s rastrem 10 mm a mělo za cíl pouze ověřit, zda navrhované přístrojové uspořádání je schopno měřit změny poměru  $L/T$  i na tlustostěnných, provozovaných dílech ovlivněných celou sérií degradačních mechanismů. I přesto, že na vzorku byla patrná velká vrstva koroze, bylo zjištěno, že poměrem  $L/T$  na úhlových PA sondách lze pomocí enkodéru detekovat a lokalizovat místa změn poměru  $L/T$  s přijatelnou mírou nejistoty. Díky použití sond PA a připojení na enkodér lze tato data sbírat automatizovaně. Výsledky odpovídají předběžnému očekávání dle Zavadila v [1]. Pro reálnou aplikovatelnost této metodiky je však nutné udělat sérii dalších měření, které jsou předmětem jeho disertační práce.

## **6.7 Použití v praxi**

Nejistota měření poměru  $L/T$  byla v rámci experimentu byla velmi dobře kontrolována a mnohonásobně překračuje potřeby pro detekci součástí ovlivněné tečením materiálu. Další vývoj této problematiky je součástí disertační práce Zavadila.

Výhodou detekce změn struktury při kontrole svarových spojů je možnost získávat data během konvenčního měření technikou PA - zobrazení poměru na přístroji je již jen problematikou úpravy softwaru. Schopnost přesné detekce míst napojení svarových housenek pozrované v této práci lze využít jako pomocný ukazatel pro konvenční NDT techniku PA. Možným problémem napojení svarových housenek je výskyt studených spojů v tomto napojení, které jsou v tomto místě vzhledem k své orientaci pomocí konvenční metody PA téměř nedetekovatelné. Poměr  $L/T$  tak může pomoci upozornit na místa, kde existuje riziko výskytu těchto vad, aby NDT operátor mohl provést cílenou kontrolu pouze vybraných míst a vyloučil tak jejich přítomnost.

## 7 Závěr

Cílem této práce bylo ověření aplikovatelnosti phased array sond pro měření poměru rychlosti podélných a příčných ultrazvukových vln  $c_L/c_T$  a jeho využití pro strukturní analýzu svarových spojů. Metodika měření změny poměru rychlosti šíření podélných a příčných ultrazvukových  $c_L/c_T$  byla řešena v [1], kde bylo prokázáno, že velikost poměru  $c_L/c_T$  je závislá na změně mikrostruktury a lokálního stavu deformace, která provází jak procesy tepelného zpracování, tak vysokoteplotní degradační procesy. Experiment byl proveden na vzorcích svarů metodou MAG materiálů z uhlíkové a nízkolegované oceli (P265H, C45+N a 54SiCr6), které byly svařeny přímo pro tuto práci.

Výsledky experimentu potvrdily, že použitím sond phased array lze dosáhnout menší nejistoty měření, než ve srovnání s použitím páru přímých konvenčních ultrazvukových sond použitých ve výše zmíněné práci. Na přesnost absolutních dat však má vliv vzájemná vzdálenost vysílací a přijímací sondy. Tento vliv má lineární charakter (odchylka měřených dat od absolutní hodnoty se s rostoucí vzájemnou vzdáleností sond mění lineárně) a řádově převyšuje nejistotu měření vyvolanou mikroskopickými změnami struktury materiálu (např. různých zrn). Z měření tudíž vyplynula nutnost použití manipulátoru či ručního scanneru, která by zajistila neměnnou vzdálenost a vzájemnou orientaci použitých sond pro vysílání a příjem ultrazvukových vln.

Během experimentu byly měřeny rozdíly v poměru  $c_L/c_T$  v závislosti na hlavních svařovacích parametrech ( $I$ ,  $U$ ,  $v$ ) a změny trendu poměru  $c_L/c_T$  v závislosti na přítomnosti lokálních změn mikrostruktury a stavu deformace v důsledku vzniku napojení svarových housenek. Bylo prokázáno, že existuje měřitelný rozdíl poměru  $c_L/c_T$  pro různá nastavení hlavních svařovacích parametrů, ale vzhledem k charakteru experimentu a malému množství vzorků nebylo možno ověřit možnost využití pro detekci změn svařovacích parametrů např. během výrobního procesu.

V rámci experimentu bylo prokázáno, že sledování výchylek od trendu poměru  $c_L/c_T$  velmi dobře reaguje na změny mikrostruktury a lokální změny deformačního pole vyvolané napojením svarové housenky. Tyto výchylky vůči průměrné hodnotě poměru  $c_L/c_T$  byly měřitelné až do rozdílu 0,008 %. Na vzorcích byl pozorován okrajový efekt vyvolaný zvýšeným podílem vneseného tepla při zahájení a ukončování svařovacího procesu. Tento okrajový efekt do určité míry zakrýval výchylky v trendu poměru  $c_L/c_T$  v těchto oblastech zkoušených vzorků.

Poslední část experimentu byla provedena na části provozovaného parovodu odstaveného z důvodu výskytu creepových trhlin na povrchu součásti v místě ohybu potrubí. Cílem měření bylo ověřit, zda navrhované přístrojové uspořádání je schopno zaznamenat s přijatelnou přesností změny poměru  $L/T$  i na tlustostěnných, provozovaných dílech ovlivněných sérií deformačních mechanismů. Bylo zjištěno, že sledováním poměru  $c_L/c_T$  na úhlových phased array sondách lze pomocí enkodéru detekovat a lokalizovat místa výchylek od výchozí hodnoty, určení nejistoty měření je však předmětem pokračujícího výzkumu.

Nejistota měření poměru  $c_L/c_T$  byla v rámci experimentů držena na velmi nízké úrovni řádově překračující potřeby pro detekci kritických míst na součástech ovlivněných tečením, než je tato metodika primárně navržena.

Výhodou navržené metodiky při kontrole svarových spojů je možnost získávat data během konvenčního zkoušení technikou Phased Array. Schopnost přesné detekce míst vzniku napojení svarových housenek lze využít jako pomocný ukazatel pro konvenční zkoušení NDT technikou Phased Array pro detekci míst se zvýšenou pravděpodobností vzniku vad. Tyto oblasti poté mohou být podrobeny místní detailní kontrole jinými technikami UT za účelem eliminování možnosti přítomnosti vad, které vzhledem k své orientaci mohou být při konvenčním zkoušení technikou Phased Array špatně detekovatelné.

## 8 Bibliografie

- ZAVADIL, Tomáš. *Využití NDT metod pro detekci strukturních změn oceli při určování zbytkové životnosti průmyslových zařízení*. Praha, 2012. Diplomová práce. ČVUT v Praze. Vedoucí práce Pitter Jaroslav.
- ŠTURMA, Martin. *Provoz, revize a údržba technických zařízení: vyhrazená technická zařízení elektrická, plynová, tlaková, zdvihací*. První vydání. Praha: Grada Publishing, 2015. ISBN 978-80-247-5121-4.
- EU. *SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY 2014/68/EU: o harmonizaci právních předpisů členských států týkajících se dodávání tlakových zařízení na trh (přepřpracované znění)*. In: . 2014.
- ZAVADIL, Tomáš. *The role of NDT in remnant life assessment of industrial sites*. 4] ATG s.r.o., Praha 9, 2015.
- §2 nařízení vlády č. 219/2016 Sb. In: . ČESKO: Sagit, 2016, ročník 2016, číslo 219. 5]
- ZAVADIL, Tomáš. *BASIC: podklady pro školení BASIC dle ISO 9712 / SNT-TC-1A*. 6] Praha, 2018.
- ARTURSON, G. *The tragedy of San Juanico: the most severe LPG disaster in history* [online]. b.r. [cit. 2018-12-11]. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/3580941>
- Accident report: exploding pressure vessel* [online]. 2013 [cit. 2019-04-10]. 8] Dostupné z: <https://app.croneri.co.uk/feature-articles/accident-report-exploding-pressure-vessel>
- JIROUSEK, Ladislav. *Výbuch akumulátoru páry a následný hromadný pracovní úraz* [online]. 2011 [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <http://www.tlakinfo.cz/t.py?t=2&i=1797&h=117>
- Tank farm plan evokes memories of a disaster. In: *Mexico News Daily* [online]. 2016

10] [cit. 2018-12-11]. Dostupné z: <https://mexiconewsdaily.com/news/tank-farm-plan-evokes-memories-of-a-disaster/>

Vyhláška č. 18/1979 Sb.: Vyhláška Českého úřadu bezpečnosti práce a Českého  
11] báňského úřadu, kterou se určují vyhrazená tlaková zařízení a stanoví některé podmínky  
k zajištění jejich bezpečnosti. In: . b.r.

Zákon č. 102/2001 Sb.: Zákon o obecné bezpečnosti výrobků a o změně některých  
12] zákonů (zákon o obecné bezpečnosti výrobků). In: . b.r.

PURJE, Juha. *ASME Boiler and Pressure Vessel Code vs. PED and EN-standards*  
13] *and nuclear safety requirements* [online]. In: . b.r., s. 5-33 [cit. 2019-01-23].

§ 6b odst. 1 a 2 zákona č. 174/1968 Sb., o státním odborném dozoru nad bezpečností  
14] práce, v platném znění. 1, 1.

CHUSE, Robert a Bryce CARSON. *Pressure vessels: the ASME code simplified*. 7th  
15] ed. New York: McGraw-Hill, 1993. ISBN 00-701-0939-7.

*Welding of Boilers, Pressure Vessels and Pressure Piping* [online]. Regina,  
16] Saskatchewan, 2007 [cit. 2019-01-31]. Dostupné z:  
<http://www.publications.gov.sk.ca/freelaw/documents/English/Regulations/Repealed/SR61-78.pdf>

KUDĚLKA, Vladimír, Pavla NEJTKOVÁ a Martin MYŠÁK. Zásady pro svařování,  
17] pájení a související procesy výroby. *Technicka-zarizeni.cz* [online]. b.r. [cit. 2019-01-30].  
Dostupné z: <https://www.technicka-zarizeni.cz/zasady-pro-svarovani-pajeni-a-souvisejici-procesy-vyroby/>

Metody svařování. *Automig.cz* [online]. Migatronik CZ a.s., b.r. [cit. 2019-01-22].  
18] Dostupné z: <http://automig.cz/o-svarovani/metody/>

HLAVATÝ, Ivo. *Teorie a technologie svařování* [online]. Ostrava, 2011 [cit. 2019-  
19] 01-30]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009svarovani/indexs.htm>. Vysoká škola  
báňská – Technická univerzita Ostrava.

HUFFORD, Tony. Welding prep in pressure vessel fabrication. *THE FABRICATOR*  
[online]. FMA Communications, Inc., 2019, **2015** [cit. 2019-01-31]. Dostupné z:

- 20] <https://www.thefabricator.com/article/cuttingweldprep/welding-prep-in-pressure-vessel-fabrication>
- Nariadení vlády č. 378/2001 Sb.: Nariadení vlády, kterým se stanoví bližší požadavky na*
- 21] *bezpečný provoz a používání strojů, technických zařízení, přístrojů a náradí.* In: . 2003.
- ČSN 69 0012: Tlakové nádoby stabilní. Provozní požadavky.* b.r.
- 22]
- ČSN EN 764-6: Tlaková zařízení- Část 6: Provozní návody.* b.r.
- 23]
- LASEK, Stanislav. *Základy degradačních procesů* [online]. První. Ostrava: VŠB –
- 24] Technická univerzita Ostrava, 2013 [cit. 2019-05-13]. ISBN 978-80-248-3373-6.
- Dostupné z: [https://www.fmmi.vsb.cz/export/sites/fmmi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-3-materialove-izenyrstvi/zaklady-degradacnich-procesu/Lasek\\_Zaklady\\_degradacnich\\_procesu.pdf](https://www.fmmi.vsb.cz/export/sites/fmmi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-3-materialove-izenyrstvi/zaklady-degradacnich-procesu/Lasek_Zaklady_degradacnich_procesu.pdf)
- MACHEK, Václav a Jaromír SODOMKA. *Nauka o materiálu 1.část: Struktury*
- 25] *kovových materiálů.* Vyd. 1. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-01-03379-1.
- Skripta. České vysoké učení technické v Praze.
- VEVERKA, J. *Svařování korozivzdorných a žárupevných ocelí* [online].
- 26] OMNITECH spol. s r.o., b.r. [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: [https://www.omnitechweld.cz/cze/clanky/svarovani\\_korozivzdornych\\_a\\_zarupevných\\_oceli.html](https://www.omnitechweld.cz/cze/clanky/svarovani_korozivzdornych_a_zarupevných_oceli.html)
- POST WELD HEAT TREATMENT OF WELDED STRUCTURES: GUIDANCE*
- 27] *NOTE 6* [online]. Australia: Welding Technology Institute of Australia, 2003 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: [http://vibfem.com.au/resources/stress\\_relieving/post\\_weld\\_HT.pdf](http://vibfem.com.au/resources/stress_relieving/post_weld_HT.pdf)
- SOUL, Farag a Nada HAMDY. Numerical Simulation of Residual Stress and Strain
- 28] Behavior After Temperature Modification. *IntechOpen Limited* [online]. North Africa: University of Elmergeb, Faculty of Engineering,, Libya and University of Menoufia, Faculty of Engineering,, Egypt, 2012 [cit. 2019-05-12]. DOI: 10.5772/47745. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/books/welding-processes/numerical-simulation-of-residual-stress-and-strain-behavior-after-temperature-modification>

LENFELD, Petr. *Technologie II: Tváření kovů a zpracování plastů* [online].  
29] Technická univerzita Liberec, b.r. [cit. 2019-04-25]. Dostupné z:  
[http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/uvod.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/uvod.htm)

GUPTA, Vibhav a Harsh VARDHAN. *Case Study on Premature Failure of Super-*  
30] *Heater Tubes in Oil & Gas Fired Boiler: PPU14* [online]. Mumbai: CORCON, 2017, ,  
56-59 [cit. 2019-05-18].

POLACH, Vladislav. *Parní kotle* [online]. Plzeň, b.r. [cit. 2019-05-18]. Dostupné z:  
31] [http://kke.zcu.cz/export/sites/kke/about/projekty/enazp/projekty/01\\_Stavba-a-provoz-](http://kke.zcu.cz/export/sites/kke/about/projekty/enazp/projekty/01_Stavba-a-provoz-stroju_1-3/1_IUT/005_Parn-kotle---Polach---P0.pdf)  
[stroju\\_1-3/1\\_IUT/005\\_Parn-kotle---Polach---P0.pdf](http://kke.zcu.cz/export/sites/kke/about/projekty/enazp/projekty/01_Stavba-a-provoz-stroju_1-3/1_IUT/005_Parn-kotle---Polach---P0.pdf). Západočeská univerzita v Plzni.

KUHN, Howard, ed. a Dana MEDLIN, ed. *ASM handbook*. Materials Park: ASM  
32] International, 2000. ISBN 0-87170-389-0.

KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH. *Úvod do studia*  
33] *materiálů*. Vyd. 1. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005. ISBN 80-7080-  
568-4.

VLACH, Bohumil. *Creep a lom při creepu*. VUT v Brně, 2003.  
34]

KOUTSKÝ, Jaroslav. *Degradační procesy a predikce životnosti*. 1. vyd. Plzeň:  
35] Západočeská univerzita, 1995. ISBN 80-7082-177-9.

HERNAS, Adam. *Žárupevné oceli a slitiny*. Ostrava: Vysoká škola báňská -  
36] Technická univerzita, 2009. ISBN 978-80-248-2187-0.

*Koroze kovů* [online]. In: NOVÁK, Pavel. Vysoká škola chemicko-technologická v  
37] Praze, b.r. [cit. 2019-03-22].

NOVÁK, Pavel. *Druhy koroze kovů* [online]. VŠCHT Praha: Ústav kovových  
38] materiálů a korozního inženýrství, 2005 [cit. 2019-04-15].

RUDASOVÁ, P. *Vysokoteplotní oxidace vysoce legované oceli* [online]. DOOSAN  
39] ŠKODA POWER, s.r.o, 2013 [cit. 2019-05-06]. DOI: 10.2478/kom-2013-0005.  
Dostupné z: <https://www.degruyter.com/downloadpdf/j/kom.2013.57.issue-2/kom-2013->



FOLDYNA, Václav. *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy*  
40] *svářečských inženýrů a technologů*. 1. vyd. Ostrava: Zeross, 1999. Svařování. ISBN 80-85771-63-2.

JANDURA, Václav a Tomáš ZAVADIL. *Nedestruktivní zkoušení: podklady pro*  
41] *školení BASIC dle ISO 9712 / SNT-TC-1A, pro výuku na VŠ a pro odbornou veřejnost*. ATG s.r.o., Praha 9, 2017.

KOPEC, Bernard. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí: (nauka o*  
42] *materiálu IV)*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 978-80-7204-591-4.

ŽBÁNEK, Petr, Jiří BLAHUŠEK, Jan MATOUŠEK a Tomáš ZAVADIL.  
43] *Ultrazvuková metoda stupeň I,II: podklady pro školení dle ISO 9712, SNT-TC-1A a EN4179/ NAS 410*. ATG s.r.o., Praha 9, 2017.

ŽBÁNEK, Petr. *Ultrazvuková metoda stupěň II - Phased Array: podklady pro*  
44] *školení dle ISO 9712, SNT-TC-1A a EN4179/ NAS 410*. ATG s.r.o., Praha 9, 2014.

SCHNEDER, R. a K. GOEBBELS. *Zertörungdfreie Bestimmung von*  
45] *Eigenspannungen mit linear polarisierten Ultraschallwellen*. VDI Berichte, 1982, (439).

OBRAZ, J. *Ultrazvuk v měřicí technice*. Druhé, upravené. Praha: SNTL, 1984. ISBN  
46] 04-222-84.

OBRAZ, J. *Zkoušení materiálu ultrazvukem*. První. Praha: SNTL, 1989. ISBN 80-03-  
47] 00097-1.

ZAVADIL, Tomáš, Petr ŽBÁNEK a Marie MOŘKOVSKÁ. *MOŽNOSTI DETEKCE*  
48] *TEPELNĚ INDUKOVANÝCH STRUKTURNÍCH ZMĚN KONSTRUKČNÍCH MATERIÁLŮ SONDAMI PHASED ARRAY*. 2019.

KOBAYASHI, Michiaki. *Analysis of deformation localization based on proposed*  
49] *theory of ultrasonic wave velocity propagating in plastically deformed solids*. International Journal of Plasticity, 2010, , 107-125. DOI: 10.1016/j.ijplas.2009.05.004.

ZAVADIL, Tomáš. *Setting of ultrasonic velocity ratio reference value of P265GH*  
50] *steel for detection of creep degradation by ordinal means of evaluation*. Nottingham:  
57th BINDT Conference Book of Proceedings, 2018.

KUMAR, Anish, T JAYAKUMAR, Baldev RAJ a K.K. RAY. *Correlation between*  
51] *ultrasonic shear wave velocity and Poisson's ratio for isotropic solid materials*. Acta  
Materialia, 2010, (51), 2417-2426. DOI: 10.1016/S1359-6454(03)00054-5.

ZAVADIL, Tomáš. *Detection of creep degradation on collapsed membrane wall*  
52] *from P265GH pressure purpose steel by Ultrasonic Testing*. Prague: ASME PVP 2018  
Book of Proceedings, 2018.

Technical specification: Sonatest VEO+. *INNERSPEC TECHNOLOGIES, INC.*  
53] [online]. North America, b.r. [cit. 2019-05-06]. Dostupné z:  
<https://www.innerspec.com/assets/files/Sonatest-VEO.pdf>

## 9 Seznam obrázků

Obrázek 1- Generace přehřáté páry v lihovaru [4] .....	15
Obrázek 2- Válcová tlaková nádoba s vyznačením kategorií svarů (A – nejnebezpečnější, D – nejméně nebezpečný) [6] .....	16
Obrázek 3- San Juanico, 1984 [10].....	17
Obrázek 4 - Proces posuzování zbytkové životnosti [4].....	22
Obrázek 5 - Etapy teplotního cyklu [6] .....	26
Obrázek 6 - Diagram ARA .....	27
Obrázek 7 - Schéma deformace svaru (a) - podélná, (b)- úhlová [28] .....	28
Obrázek 8 - Předpokládané smrštění v oblasti svaru [28] .....	28
Obrázek 9 - Tepelně ovlivněná oblast [6].....	29
Obrázek 10- Křivka tečení.....	30
Obrázek 11- Křivka tečení pro různé teploty a napětí .....	32
Obrázek 12 - Znázornění pohybu částic podélných (ve směru šíření) a příčných (kolmo na směr šíření) ultrazvukových vln (šipky znázorňují způsob kmitání atomů) [1] .....	39
Obrázek 13 - Poměr $\nu_{\text{LcL}}/cT$ jako funkce Poissonova čísla $\mu$ pro izotropní kontinuum. (oblast hodnot pro konstrukční oceli ( $\mu = 0,25 \div 0,30$ ) značí adekvátní rozsah $cLcT = 1,73 \div 1,87$ [52].....	41
Obrázek 14 - Přístroj sonatest VEO+ [53].....	45
Obrázek 15 - Měření pomocí ručního skeneru MagMan.....	46
Obrázek 16 - Princip měření sondami Phased Array při konstantní vzdálenosti předsádek [48] .....	48
Obrázek 17 - Princip měření s vyznačenými místy měření, rozložením sond a návrhem budoucího svarového spoje [48] .....	48
Obrázek 18- Návrh rozložení napojení ve vzorcích B a C .....	49
Obrázek 19- Fotografie krycí housenky (nahore), záznam indikací pomocí techniky Phased Array na vzorku A-4 (dole) .....	52
Obrázek 20 - Fotografie krycí housenky (nahore), záznam indikací pomocí techniky PA vzorku A-1 .....	55
Obrázek 21- fotografie krycí housenky (nahore) a záznam indikací pomocí techniky Phased Array na vzorku A-2(dole) .....	56
Obrázek 22 - fotografie krycí housenky (nahore) a záznam indikací pomocí techniky Phased Array na vzorku A-3 (dole) .....	57

Obrázek 23 - Fotografie krycí housenky (nahore), záznam indikací pomocí techniky Phased Array na vzorku A-4 .....	58
Obrázek 24 - fotografie krycí housenky (nahore) a záznam indikací pomocí techniky Phased Array na vzorku B-1 (dole).....	59
Obrázek 25- fotografie krycí housenky (nahore) a záznam indikací pomocí techniky Phased Array na vzorku B-2 (dole).....	60
Obrázek 26 - Fotografie krycí housenky (nahore) a záznam indikací pomocí techniky Phased Array na vzorku B-3 (dole).....	61
Obrázek 27 -fotografie krycí housenky (nahore) a záznam indikací pomocí techniky Phased Array na vzorku B-4 (dole).....	62
Obrázek 28 - Fotografie krycí housenky (nahore) a záznam indikací pomocí techniky Phased Array na vzorku C-1 .....	63
Obrázek 29 - Fotografie krycí housenky (nahore) a záznam indikací pomocí techniky Phased Array na vzorku C-2 (dole).....	64
Obrázek 30 - Fotografie krycí housenky (nahore) a záznam indikací pomocí techniky Phased Array na vzorku C-3 (dole).....	65
Obrázek 31 - Fotografie krycí housenky (nahore) a záznam indikací pomocí techniky Phased Array na vzorku C-4 (dole).....	66
Obrázek 32 -fotografie krycí housenky (nahore) a záznam indikací pomocí techniky Phased Array na vzorku B-2R(dole) .....	67
Obrázek 33 - C-Sken parovodu .....	68
Obrázek 34 - Fotografie parovodu.....	68

## 10 Seznam rovníč

(2.1).....	25
(2.2).....	31
(3.1).....	39
(3.2).....	39
(3.3).....	40
(3.4).....	40
(3.5).....	40
(3.6).....	40

## 11 Seznam tabulek

Tabulka 1.1 – Příklady evropských a ekvivalentních amerických standardů .....	19
Tabulka 2 - Svařovací parametry vzorku A-4 .....	51
Tabulka 3 - Svařovací parametry vzorku A-4 .....	53
Tabulka 4 - Svařovací parametry vzorku A-1 .....	55
Tabulka 5 - Svařovací parametry vzorku A-2 .....	56
Tabulka 6- Svařovací parametry vzorku A-3 .....	57
Tabulka 7 - Svařovací parametry vzorku A-4 .....	58
Tabulka 8 - Svařovací parametry vzorku B-1 .....	59
Tabulka 9 - Svařovací parametry B-2 .....	60
Tabulka 10 - Svařovací parametry .....	61
Tabulka 11 - Svařovací parametry .....	62
Tabulka 12- Svařovací parametry C-1 .....	63
Tabulka 13 - Svařovací parametry .....	64
Tabulka 14 - Svařovací parametry .....	65
Tabulka 15 - Svařovací parametry .....	66
Tabulka 16 - Svařovací parametry B-2R .....	67

## 12 Seznam grafů

Graf 1 - Měření tvrdosti na vzorku A-4 .....	51
Graf 2 - hodnoty L/T poměru .....	51
Graf 3- Různá vzájemná vzdálenost sond.....	53
Graf 4 – Závislost poměru L/T na vzájemné vzdálenosti sond .....	54
Graf 5 - Měření poměru L/T A-1 .....	55
Graf 6 - Měření poměru L/T A-2.....	56
Graf 7 - Měření poměru L/T A-3 .....	57
Graf 8 - Měření poměru L/T A-4.....	58
Graf 9 - Měření poměru L/T B-1 .....	59
Graf 10 - Měření poměru L/T B-2 .....	60
Graf 11 - Měření poměru L-T B-3 .....	61
Graf 12 - Měření poměru L/T B-4 .....	62
Graf 13 -Měření poměru L/T C-1 .....	63
Graf 14 - Měření poměru L/T C-2 .....	64
Graf 15 - Měření poměru L/T C-3 .....	65
Graf 16 - Měření poměru L/T C-4 .....	66
Graf 17 - Měření poměru L/T B-2R .....	67

## **13 Seznam příloh**

A - Vybraná data z WPS

B - Grafy hodnot poměrů  $L/T$  před a po svaření vzorků sad A, B, C

C - Chemické složení materiálů